

Vysoké učení technické v Brně
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav mikroelektroniky

Název v češtině:

**Reliéfní difraktivní struktury pro optické elementy realizované pomocí
elektronové litografie**

Název v angličtině:

**Manufacturing of relief diffractive structures for optical elements using
electron-beam lithography**

Obor: **Mikroelektronika a elektrotechnika**

Edice: **PhD Thesis**

Autor: **Lukáš Daněk**

Školitel: **Doc. Ing. Vladimír Kolařík, Ph.D.**

Oponenti:

Datum obhajoby:

Klíčová slova:

Elektronová litografie
elektronový litograf BS600
difraktivní struktury

Key Words:

Electron beam lithography
Electron-beam writer BS600
Diffraction structures

OBSAH:

1	DIFRAKČNÍ OPTELEKTRONOVÉ LITOGRAFIE	4
1.1	Difrakční optické prvky	4
1.2	Elektronový litograf BS 600	4
1.2.1	Vytváření víceúrovňových struktur pomocí elektronové litografie.....	5
1.2.2	Vliv blízkosti (proximity effect).....	6
1.3	Ochranné prvky exponované na litografu BS600	7
1.3.1	Příprava dat pro BS600	8
1.3.2	Technika Multimatrix®	8
1.3.3	Technika e-Direct™	8
2	CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	8
3	DIFRAKČNÍ MŘÍŽKY	9
3.1	Algoritmy pro generování difrakčních mřížek	9
3.2	Difrakční mřížky pro Multimatrix®	10
3.3	Difrakční mřížky pro e-Direct™	11
3.4	Barevné rozvoje	11
3.5	Nastavení difrakční účinnosti mřížek	12
3.6	Generování náhodného rozmístění mřížek	12
3.7	Závěr	13
4	DIFRAKTIVNÍ STRUKTURY SE SKRYTÝM OBRAZEM	14
4.1	Úprava obrazu difrakce	14
4.2	Optimalizace převodu obrazu difrakce metodou iterativní Fourierovy transformace	16
4.3	Převod difraktivní struktury na expoziční data	16
4.4	Zpracování víceúrovňových difraktivních struktur se skrytým obrazem	18
4.5	1D FFT a IFTA	18
4.5.1	Štěrbínová mřížka	19
4.5.2	2D/3D, 3D realizované syntetickými hologramy	19
4.6	Závěr	19
5	ZONÁLNÍ STRUKTURY	20
5.1	Výchozí stav řešení	20
5.2	cíle a řešení	21
5.2.1	Vstupy algoritmu	21
5.2.2	Postup algoritmu	22
5.2.3	Ukázka	23
5.3	Závěr	24
6	VELKOPLOŠNÉ STRUKTURY	25
6.1	Kalibrace vychylovacího pole elektronového litografu BS600	26
6.1.1	Matematický model	26
6.1.2	Zpracování	26
6.1.3	Funkce pro analýzu obrazu	27
6.1.4	Podpůrné funkce	28
6.1.5	Korekce odečtených odchylek	29
6.1.6	Výsledky kalibrace	29
6.2	Dělení grafického motivu na pole obecného tvaru	29
6.3	Závěr	31
7	ZÁVĚR	32

1 DIFRAKČNÍ OPTELEKTRONOVÉ LITOGRAFIE

1.1 DIFRAKČNÍ OPTICKÉ PRVKY (DOE)

DOE jsou v dalším textu rozděleny podle požadovaného obrazu difrakce na:

- difrakční mřížky (jsou speciálním případem Fourierovské i zonální struktury - požadovaným obrazem je bod; reliéf se skládá z rovných čar),
- Fourierovské difraktivní struktury (požadovaným obrazem je více bodů) a
- neperiodické difraktivní struktury (difrakční obraz nemusí být předem určen; definován je zpravidla reliéf jako takový)

DOE je možno vyrobit na laserové lavici rytím tenkým hrotem nebo expozicí na elektronovém litografu. Výhodou expozice DOE na laserové lavici je vysoká účinnost; vytvářet však není možno neperiodické difraktivní struktury a kvalita difrakčního obrazu Fourierovských struktur je ve srovnání s kvalitou dosažitelnou expozicí na elektronovém litografu nižší. Množství typů DOE produkovatelných rytím je omezeno na difrakční mřížky. Výhodou je vysoké přiblížení se optimálnímu tvaru struktury, které má za následek vysokou kvalitu difrakční struktury nazývanou difrakční účinností. Difrakční účinnost je definována jako poměr kvadrátů modulů amplitud vlny difraktované a dopadající.

Difraktivní strukturou exponovanou v EBL nejčastěji jsou difrakční mřížky. Směr difrakce je dán úhlem ohybu difraktované vlny, který popisuje mřížková rovnice.

$$\sin \theta_q = \sin \theta_i + q \frac{\lambda}{\Lambda} \quad (1.1)$$

kde q difrakční řád, θ_q úhel ohybu vlny q -tého difrakčního řádu, θ_i úhel dopadu difraktované vlny, λ vlnová délka difraktované vlny, Λ perioda mřížky.

1.2 ELEKTRONOVÝ LITOGRAF BS 600

Litografický systém Tesla BS 600 byl vyvinut v 80. letech minulého století v ÚPT AVČR. Skládá se z vlastní aparatury litografu a řídicího systému. Základními technickými parametry elektronového litografu Tesla BS 600 během práce byly*:

- | | |
|--|-------------------------------|
| • urychlovací napětí (energie elektronů) | 15 kV (15 keV) |
| • tvar svazku | pravoúhlý s proměnným tvarem |
| • rozměr svazku | <0,1; 6,3> μm s krokem 0.1 μm |
| • velikost vychylovacího pole | 3,2767 mm v X a Y |
| • krok vychylování | 0,1 μm |
| • rozměr substrátu | 3" nebo 4" |
| • katoda | autoemisní, wolfram 100 |

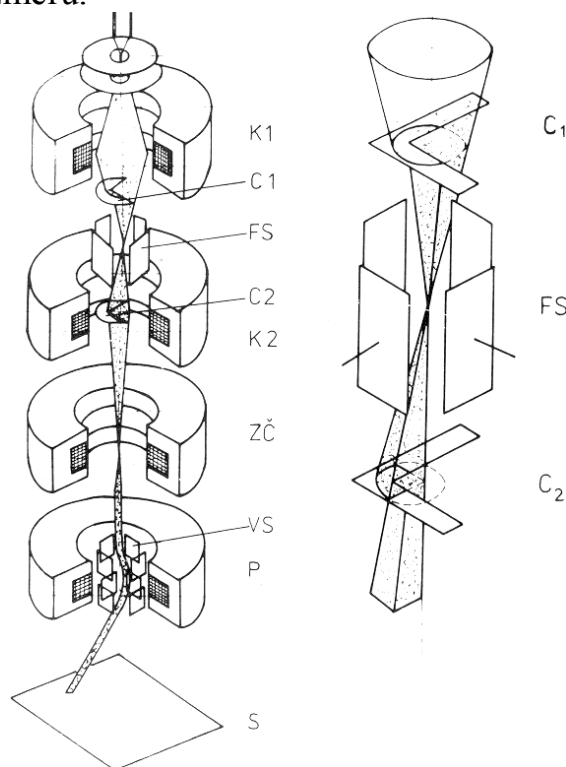
*) celý text se bude dále vztahovat k těmto parametrům, nicméně elektronový litograf BS 600 byl modernizován, což bylo publikováno. Parametry po modernizaci.

Na Obrázek 1.1 je uvedeno schéma optické soustavy litografu a systém pro formování elektronového svazku. Uveďme alespoň význam základních pojmů (vychylování, tvarování, čočky), které se dále v tomto textu běžně vyskytují.

Elektronový svazek emitovaný z hrotu wolframové katody je směřován, zaostřen a promítán soustavou elektromagnetických čoček (K1, K2, ZČ, P) do roviny substrátu (S).

Vychylování svazku v osách X a Y (VS) je elektromagnetické, vychylovací cívky jsou buzeny ze zesilovače, který je na výstupu D/A převodníku řízeného datovým systémem.

Tvarování (formování) svazku je provedeno pomocí pevných pravoúhlých clon (C1, C2). V prostoru mezi clonami jsou elektrostatické vychylovací destičky, které umožňují vychýlení svazku v prostoru druhé clony. Tím dojde k zaclonění části svazku a změně jeho rozměrů.



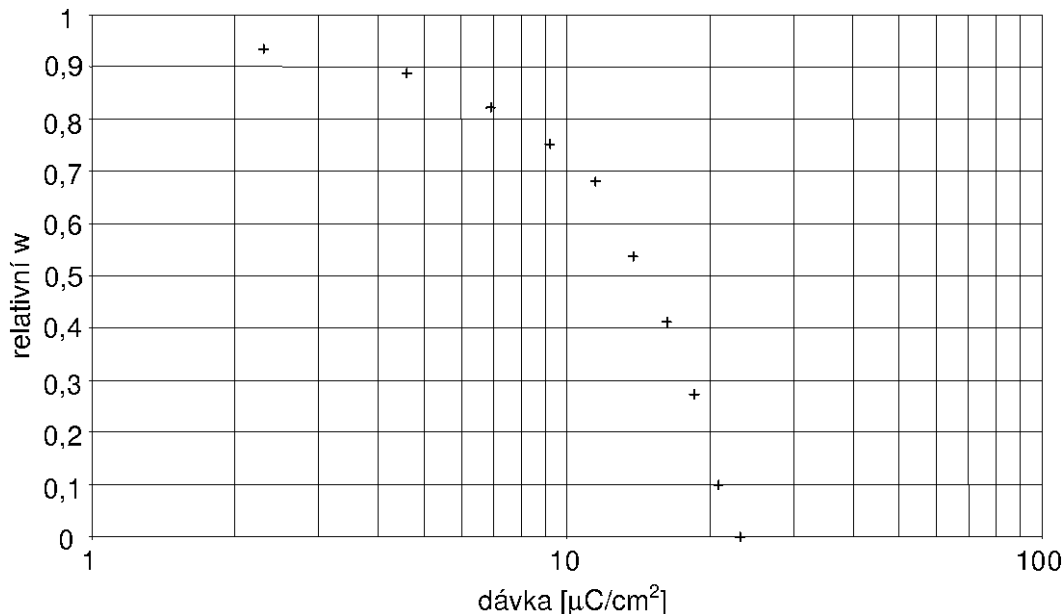
Obrázek 1.1 Schéma optické soustavy litografu a schéma pro formování elektronového svazku

Elektronový svazek je u vektorových systémů vychylován podle detailů vytvářené struktury, čímž je dána vyšší složitost vychylovacího systému, neboť musí kompenzovat hysterezní efekty a veliké vychylovací úhly. Expoziční dávka Q je při tvarovaném svazku dána vztahem $Q = I \tau$, kde I [$A \cdot cm^{-2}$] je proudová hustota a τ [s] je expoziční doba.

1.2.1 Vytváření víceúrovňových struktur pomocí elektronové litografie

Problematika tvorby víceúrovňových difrakčních struktur spočívá především ve volbě technologických podmínek a určení expozičních dávek, resp. expozičních časů, pro jednotlivé hloubky resp. úrovně. Závislost výsledné hloubky na expoziční dávce je nelineární a nazýváme ji citlivostní křivkou rezistu. Citlivostní křivku na Obrázek 1.2 poskytl Mgr. František Matějka a je vyhodnocením citlivosti rezistu ER1 - PMMA v pixelech $0,5 \times 0,5 \mu m$ pomocí snímku AFM. Doba vyvolání ve vývojce amylacetát byla 25 minut.

Poměr přírůstku dávky k přírůstku hloubky je pro dávky odpovídající relativní hloubce menší než 0,5 zhruba dvojnásobkem téhož poměru pro dávky větší, z čehož vyplývá, že stejná chyba při určení dávky způsobí asi poloviční odchylku od požadované hloubky pro relativní hloubky nad 0,5. Menší použité dávky také snižují zkreslení vlivem blízkosti expozic. Může tedy být výhodné pracovat ve vyšších rezistech a nedosahovat úrovně substrátu.



Obrázek 1.2 Expoziční křivka rezistu ER1-PMMA vyvolaná ve vývojce amylacetát 25min

Výška každého bodu reliéfu je dána celkovou absorbovanou dávkou. Empiricky bylo zjištěno, že se okolní expozice vlivem blízkosti podílejí na dosažené hloubce při vzdálenosti 1 μm zhruba 25 %. Jsou-li v exponovaném reliéfu zastoupeny plochy o velikostech menších nebo rovných 1 μm a současně velikosti větší, použité dávky by se pro dosažení stejné hloubky dle velikosti exponované plochy měly lišit. Jsou-li takové plochy na úrovni substrátu, je možno pro všechny použít dávku odpovídající nejmenší ploše, protože přexponování substrátu jeho výšku neovlivní.

Část celkové dávky vyzářené při expozici dopadne vlivem srážek se zbytkovými částicemi v evakuovaném prostoru mimo plochu dopadu paprsku, což způsobí expozici celé plochy rezistu. Výška rezistu po vyvolání tedy neodpovídá výšce po nanesení.

1.2.2 Vliv blízkosti (proximity effect)

Při průchodu záření elektronů tuhým materiálem, a tedy i polymerním filmem, dochází k elastickým a neelastickým kolizím elektronů, při nichž elektrony předávají svou energii ozařovanému materiálu. Rozptyl elektronů vede k rozšíření elektronového záření do všech směrů, a tedy nejen do směru dopadajícího svazku.

Rozptyl elektronového záření lze rozdělit dle směru jeho šíření v rezistu na záření zachovávající směr dopadajícího svazku a na zpětně odražené záření. Velikost elektronového toku v určitém bodě filmu rezistu závisí na protonovém čísle, na hustotě podložky, typu rezistu a na rychlosti dopadajících elektronů. Expozice rezistu v místech, kam nedopadá původní záření, se nazývá vliv blízkosti a vede

ke značným změnám tvaru a velikosti zobrazované struktury. Tento efekt se stává významným zvláště u struktur s detaily menšími než 1 μm .

1.3 OCHRANNÉ PRVKY EXPONOVANÉ NA LITOGRAFU BS600

Hologram, byť s jediným obrazem, je ve světě uznávaným ochranným prvkem. **Hologramy s jediným obrazem** jsou nejčastěji vyráběny opticky pro dosažení nižších nákladů výroby. Optickou cestou však není možné dosáhnout vysoké přesnosti, což je vidět i při pohledu na difraktivní struktury pod mikroskopem.

S rostoucí složitostí hologramu roste i stupeň zabezpečení. Proto již **hologram se dvěma úhly pozorování** použitými ve stejném místě plochy hologramu 0° a 90° budou pozorovatelem snadno odlišitelné, bude obtížnější vyrobit a pod mikroskopem se od padělků napodobených optickou cestou stává snadněji rozeznatelným. Snadnější rozeznatelnost spočívá v možnosti nahlédnutí na libovolné místo difraktivní plochy oproti hologramu s jediným obrazem, kde je nutné hledat okraj exponované plochy. Musíme mít ale stále na paměti, že difraktivní plocha každého ze dvou obrazů je jejich zadáním do stejného místa méně než poloviční, čímž i výsledná svítivost bude výrazně nižší.

Přestože se úměrně s počtem obrazů snižuje viditelnost motivu, návrháři hologramů kombinují do jednoho místa difraktivní plochy i větší počty obrazů nejčastěji za účelem získání pocitu prostorovosti. Protože je viditelnost obrazu úměrná počtu kombinovaných motivů a pro popisovaný příklad odpovídající počtu úhlů pozorování, často výrazně nižší než viditelnost ostatních ochranných prvků hologramu, je návrhářům doporučováno používat difrakční mřížky s maximální difrakční účinností, které ale odstraní z motivu všechny stíny. Pro ochranné prvky s prostorovými motivy ochuzenými o stíny bude dále používán výraz **2D/3D** a pro plně prostorové výraz **3D**.

Nano struktury jsou nedifraktivní ochranné prvky, které není možno vyrobit na laserové lavici, ani je není možno rýt, pro jejich kontrolu je však nutno použít mikroskop, kde je nalézána hledaná struktura, kterou může být libovolný motiv.

Ochranné prvky se skrytým obrazem nemohou být ryty, ani je není možno vytvářet na laserové lavici. Jejich vyhodnocení je však podmíněno dopadem svazku jednobarevného světla a zachycením difraktovaného obrazu na ploše, která v dalším textu bude označována výrazem stínítko. Bodů obrazu difrakce je na tomto typu ochranných prvků zpravidla velké množství a jsou vzájemně natolik blízko, že při dopadu bílého světla se difraktované světlo zdá být nevýrazné, bílé. Výhodou ochranných prvků se skrytým obrazem je jistě množství informace, které je na malé ploše možno zaznamenat.

Specifickým ochranným prvkem jsou **zonální struktury**. Jejich výroba, oproti ochranným prvkům se skrytým obrazem, by byla možná rytím, ale oproti difrakčním mřížkám a obrazům z nich složených je není možno vyrobit na laserové lavici, čímž stupeň zabezpečení roste. Vyhodnocení, oproti ochranným prvkům se skrytým obrazem, je možné očima a oproti difrakčním mřížkám se stávají v hologramu zajímavými, není-li možno zajistit dostatečně ostré světlo nebo jeho dopad pod správným úhlem.

1.3.1 Příprava dat pro BS600

Elektronový litograf Tesla BS600 byl navržen a vyroben na Ústavu přístrojové techniky v Brně pro společnost Tesla za účelem výroby masek mikročipů. Pro generování dat byl společně s elektronovým litografem navržen také specifický jazyk ASBEST. Další rozvoj přinesla spolupráce laboratoře elektronové litografie se společností Czech Holography s.r.o., později Optaglio s.r.o. Popisovaný rozvoj přineslo zaměření se na difraktivní struktury a je založen na používání technik Multimatrix[®] a e Direct[™], které jsou vlastnictvím společnosti Optaglio s.r.o.

1.3.2 Technika Multimatrix[®]

Nároky kladené na techniku Multimatrix[®] v době kdy byla navrhována, byly především na přesun kontroly výsledku na návrháře hologramu a přenos minimálního objemu dat mezi návrhářem hologramu, přípravou dat a expozičním počítačem. Proto vznikla jednoduchá myšlenka zaslání dat vzhledu požadovaného hologramu v obrazové formě ve standardizovaném zvětšení a přiřazení každé z barev popisu difrakční mřížky. Difrakční mřížky jsou však na straně přípravy dat omezeny velikostí. Výhodou byla možnost vytvoření knihoven, které nebyly mezi přípravou dat a řídicí jednotkou elektronového litografu přenášeny, ale jen dle potřeby aktualizovány.

1.3.3 Technika e-Direct[™]

Možnost vyvinout techniku e Direct[™] přišla s rozvojem výpočetní techniky. Cílem techniky e Direct[™] bylo zvýšení rozlišení grafiky motivu hologramu. Zachovává kontrolu výsledného vzhledu návrháři, stejně jako způsob zadávání. Přínosem bylo odstranění omezení spojených s pevně zvolenou velikostí difrakčních mřížek a možnost optimalizace dat pro expozici nano struktur. Technika e Direct[™] byla realizována firmou ELTEK s.r.o. pro Czech Holography s.r.o. uzavřeným generátorem binárních datových souborů nazvaným G Master.

2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Cílem disertační práce bylo dosažení zlepšení optických parametrů difraktivních struktur realizovaných v EBL na BS600.

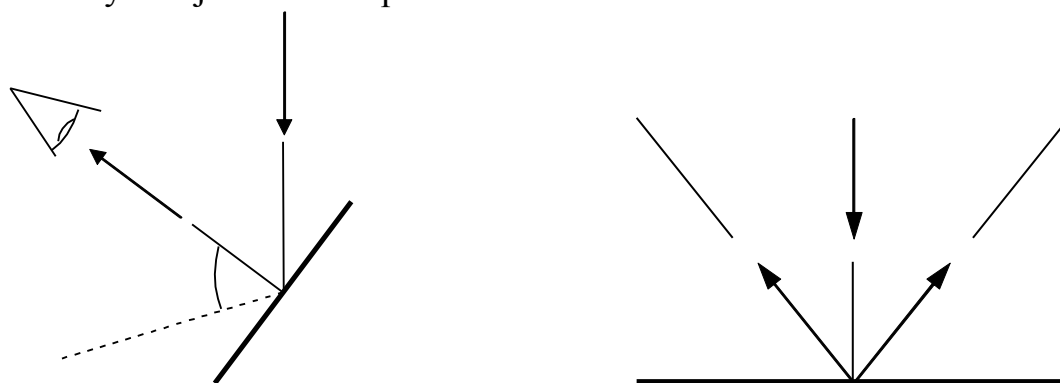
Jistých zlepšení optických parametrů difraktivních struktur navržených Prof. Richterem bylo dosaženo použitím nástroje pro vyhledání bodů ovlivněných vlivem blízkosti, který byl výsledkem mé diplomové práce. Nástroj pro vyhledání specifických bodů byl však vytvořen podle zadání Mgr. Matějky.

Cílem studia proto bylo pokračovat v rozšiřování znalostí v oboru elektronové litografie a dosažení úrovně schopnosti navrhovat nástroje pro zvýšení optických parametrů samostatně.

Práce v EBL však brzy odhalila výrazně větší možnosti zlepšování optických parametrů difraktivních struktur na úrovni návrhu difraktivních struktur a přípravy dat pro elektronový litograf BS600. Řešeny pak byly konkrétní úkoly, které byly ihned prakticky využívány.

3 DIFRAKČNÍ MŘÍŽKY

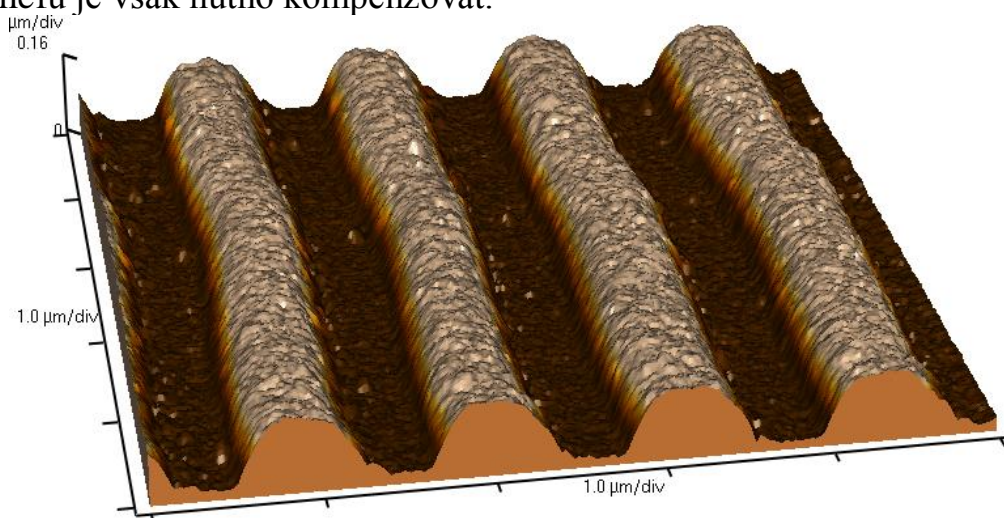
Difrakční mřížky jsou v EBL nejčastěji exponovanou difraktivní strukturou. Proč tomu tak je? Ochranné prvky užívané v denním životě vyžadují vysokou intenzitu jasu zvolených barev, protože by měly být i při pohledu v denním světle viditelné a jednotlivé barvy by měly být snadno odlišitelné. Poměr intenzity světla difraktovaného binární mřížkou do obou prvních řádů difrakce je (teoreticky) 1:1. Na Obrázek 3. jsou zobrazeny pouze difrakční řády menší než dva. Užitím mřížky nesymetrické je možné intenzitu difraktovaného světla do zvoleného bodu difrakce posílit. Přestože jsou ochranné prvky užívány v denním životě, je pro návrh nutné stanovit, za jakých podmínek bude dosaženo požadovaných efektů. Zvolen byl model dopadu světla kolmo na difrakční mřížku. Zavedený model pro binární mřížku vystihuje schéma v pravé části Obrázek 3..



Obrázek 3. Model pozorování ochranných prvků nalevo užívaný při návrhu hologramu

3.1 ALGORITMY PRO GENEROVÁNÍ DIFRAKČNÍCH MŘÍŽEK

Důvodem pro algoritmizování generování difrakčních mřížek byla zvýšená potřeba je generovat. Potřebu způsobila změna volby parametrů mřížek po analýze exponovaných mřížek generovaných podle analýzy expozičních dat, která ukázala, že nejvyšší účinnosti dosahují binární mřížky s poměrem ploch exponované a neexponované 1:1. Rozptyl elektronů mimo směr dopadu způsobující změnu profilu reliéfu je však nutno kompenzovat.



Obrázek 3.1 Binární difrakční mřížka změřená mikroskopem atomárních sil

3.2 DIFRAKČNÍ MŘÍŽKY PRO MULTIMATRIX®

Data pro elektronový litograf byla v minulosti vytvářena operátorem. Vytvoření kódu v jazyku ASBEST popisujícího mřížku bylo časově náročné a pro přehlednost kódu byl užíván vyšší než nutný počet instrukcí. Kód byl pro mřížky se sklonem různým od 0° a 90° zpravidla dělen do tří částí – rohů mřížky a čáry, která byla opakována; to vytvářelo odchylku od ideálního tvaru. Cílem úkolu bylo navržení algoritmu pro vytváření mřížek zvolených parametrů omezených čtvercem o zvolené velikosti při současném dosažení co nejvyšší difrakční účinnosti a současném zachování co nejnižší expoziční náročnosti dané počtem instrukcí.

Vytváření dat pro řízení svazku elektronového litografu popisujících strukturu difrakčních mřížek bylo algoritmizováno. Výstupem algoritmu je kód v jazyku ASBEST. Vstupními parametry algoritmu jsou:

1. velikost mřížky v rozlišení litografu $[0,1 \mu\text{m}]$,
2. poloha bodu v difraktogramu vztažená k nultému difrakčnímu řádu $[-]$,
3. střída zadaná jako poměr ploch exponované ku celkové $[-]$,
4. minimální velikost elementární expozice $[0,1 \mu\text{m}]$,
5. maximální velikost elementární expozice $[0,1 \mu\text{m}]$.

Výhodou volby parametru poloha bodu v difraktogramu, jehož význam v konečném důsledku je úhel směru pozorování difrakce oproti zadání úhlu směru difrakce, je zajištění návaznosti jednotlivých čar mřížky, které vycházejí z vlastností Fourierovy transformace.

Parametr střída umožňuje dosažení maximální účinnosti; pro různé rezisty, vývojky a podmínky vyvolávání se liší a má přímý vliv na určení času expozice jednotlivých elementárních expozic.

Důvodem pro specifikaci minimální velikosti elementární expozice je časová náročnost. Minimální užívaná velikost elementární expozice je $0,3 \mu\text{m}$. Důvodem pro zvýšení velikosti elementární expozice by bylo snížení časové náročnosti, zvyšování minimální velikosti elementární expozice však snižuje difrakční účinnost.

Implementaci posledních dvou uvedených parametrů umožnilo pojetí algoritmu odvozené z rovnice přímky. Výstup zvoleného výsledného řešení je na Obrázek 3.2. Mřížka má při exponované ploše 45,88% účinnost 37,56% a na nultý řád 0,68%.



Obrázek 3.2 Vygenerovaná mřížka a rekonstrukce obrazu

Kromě již představené varianty byl algoritmus upraven tak, aby vznikající mezery byly vyplňovány posledními elementárními expozicemi před nimi. Použití mřížek generovaných oběma již popsány verzemi algoritmu je vhodné při expozici ploch

difraktujících více motivů v téže ploše. Pro souvislé plochy vyplněné jedinou mřížkou byl algoritmus upraven tak, aby elementární expozice na okraji přesahovaly rozměry mřížky, ale vzájemně se nepřekrývaly.

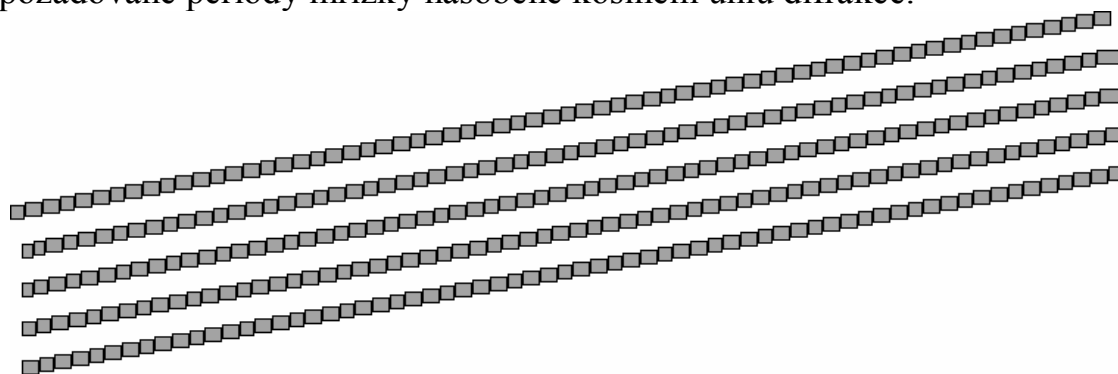
3.3 DIFRAKČNÍ MŘÍŽKY PRO E-DIRECT™

Algoritmus implementovaný v programu G-Master pro generování mřížek umožňuje zadat libovolný sklon úhlu; vygeneruje však jedinou nejkratší možnou čáru pod zvoleným úhlem a tu pak, s konstantním celočíselným krokem v jednotkách rozlišení litografu, kopíruje. Důvodem pro volbu tohoto přístupu implementace algoritmu byla minimalizace nároků na hardware při vyplňování. Nevýhodou tohoto přístupu je omezení period mřížek, které je možno užít, a to i pro mřížky skládající se pouze z rovných čar, na mřížky s periodou v jednotkách rozlišení litografu. Nejsou-li periody rozvoju celočíselné, jsou zaokrouhlovány, což způsobuje nelinearitu rozvoje.

Požadavkem na zvýšení linearitu rozvoju při užití nástroje pro vyplňování ploch vznikla potřeba vytvoření nástroje pro generování mřížek zvolených parametrů.

Řešení bylo získáno úpravou algoritmu představeného v kapitole **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..** Vstupní parametry velikost mřížky a poloha bodu v difraktogramu byly nahrazeny parametry vlnová délka vlny dopadající na strukturu kolmo a vektor difrakce. Úprava spočívala především v odvození velikosti stran opakovaného motivu z požadovaného směru difrakce. Odvození vychází z pravidel:

1. poměr stran musí odpovídat tangentě úhlu difrakce,
2. velikost kratší strany opakované struktury musí být celočíselným násobkem požadované periody mřížky násobené kosinem úhlu difrakce.



Obrázek 3.3 Simulace dat pro binární difrakční mřížku generovanou pro techniku e-Direct™

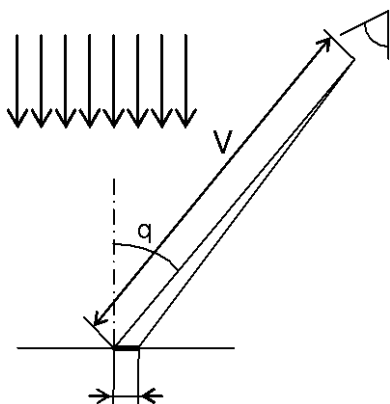
3.4 BAREVNÉ ROZVOJE

Barevné rozvoje jsou v EBL standardně realizovány s omezeními odvozenými v předchozích kapitolách vyplývajících pro maticový přístup vyplňování z rozlišení grafického motivu a pro přístup vyplňování z rozlišení litografu.

Řešení bylo optimalizováno rozdělením plochy o celkové velikosti v_c vyplněné barevným rozvojem v intervalu vlnových délek $\langle \lambda_1; \lambda_2 \rangle$ na n oblastí o stejných velikostech v . Hledané hodnoty $n = \sqrt{v_c \cdot \sin(\theta) \cdot |\lambda_1^{-1} - \lambda_2^{-1}|}$ a $v = \sqrt{v_c / \sin(\theta) \cdot |\lambda_1^{-1} - \lambda_2^{-1}|}$ byly určeny rovnicemi odvozenými z mřížkové rovnice.

Vlnová délka i -té z n oblastí je dána rovnicí $\lambda_i = \lfloor \lambda_1 - \lambda_n \rfloor / (n-1) \cdot (i-1)$.

Barevný rozvoj může být užit pro kompenzaci změny úhlu pozorování způsobující změnu barvy v různých místech grafického motivu, kterou vystihuje společně s popisem vstupních parametrů vztah $\lambda_2 = \lambda_1 / \sqrt{[\cos(\theta) + v/V]^2 + \sin^2(\theta)}$.



Obrázek 3.4 Změna barvy grafického motivu vlivem změny úhlu pozorování

Řešení rovnice však předpokládá dopad rovinné vlny na strukturu kolmo a vyžaduje určení polohy pozorovatele.

3.5 NASTAVENÍ DIFRAKČNÍ ÚČINNOSTI MŘÍŽEK

Nastavení difrakční účinnosti mřížek je požadováno návrháři hologramů při používání 3D motivů. Byly zkoumány dva přístupy k dosažení požadovaného efektu a zvolený vedl k požadavku na další úpravu algoritmu pro generování difrakčních mřížek. Úpravy zadání spočívaly v zadávání úhlu natočení stejně jako pro techniku e-DirectTM, přestože výstupem je požadována čtvercová mřížka stejně jako pro techniku Multimatrix[®]. Novým parametrem je požadovaná difrakční účinnost mřížky. Úprava algoritmu spočívala v generování dat elementárních expozic pouze pro plochu přinášející požadovaný efekt. Vztah plochy a difrakční účinnosti byl vyhodnocován externě a do algoritmu předán ve formě tabulky.

3.6 GENEROVÁNÍ NÁHODNÉHO ROZMÍSTĚNÍ MŘÍŽEK

Se vzrůstajícími nároky na počet bodů kombinovaných v jednom místě plochy, které vznikaly především z důvodu potřeby odstranění rušivého dojmu vznikajícího při zachycení mezery mezi jednotlivými úhly pozorování, vzrůstal požadavek na odstranění omezení při volbě počtu obrazů. Počet obrazů je dán umístováním do čtvercových matic. S velikostí strany čtverce však vzrůstá pravděpodobnost zachycení rastru již pouhým okem.

Optimálním řešením by bylo vytvoření matice náhodných čísel se:

1. stejným zastoupením bodů jednotlivých obrazů na ploše a
2. maximální homogenitou každého jednotlivého obrazu.

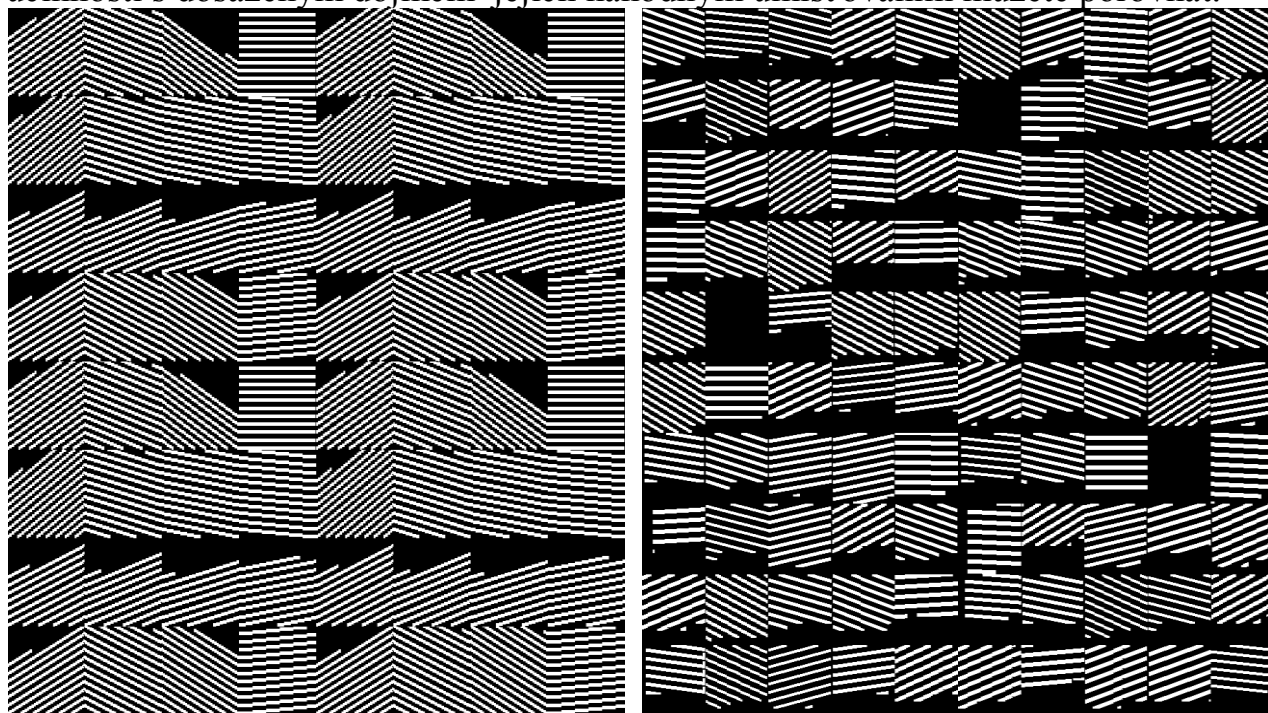
Bylo vyzkoušeno několik přístupů k řešení, které se zabývaly přímo generováním matice náhodných čísel. Pro praktické užití byl zvolen přístup optimalizace matice náhodných čísel vygenerované algoritmem využívajícím Gaussovy normální distribuce. Hlavním důvodem pro volbu tohoto řešení byla nižší časová náročnost zpracování.

Generování náhodných čísel je v matematice řešeným problémem. Předností užití dostupných algoritmů založených na Gaussově normální distribuci a Wignerově půlkruhově distribuci je rychlost generátorů náhodných čísel. Nevýhodou je především nevyhovující homogenita zastoupení jednotlivých obrazů na ploše; rozdíly v zastoupení bodů jednotlivých mřížek v matici byly shledány jako přijatelné.

Zvoleným řešením bylo sestavení algoritmu kontrolujícího vygenerovanou matici o zvoleném počtu hodnot náhodných čísel. Podmínkou dostatečnosti homogenity matice byl zvolen výskyt jediného bodu právě kontrolované hodnoty v poli o velikosti odpovídající počtu hodnot náhodných čísel. Vyskytuje-li se v kontrolovaném poli více bodů stejné hodnoty, jsou hodnoty bodů pozměněny tak, aby byla snížena odchylka zastoupení bodů v matici. Časová náročnost kontroly roste exponenciálně s velikostí matice; proto je vygenerována a kontrolována matice odpovídající svou velikostí výkonu počítače, na kterém je zpracovávána.

Vygenerovaná matice náhodných čísel je sadou binárních masek, jejichž vynásobením požadovanými obrazy pro jednotlivé pohledy a následným sečtením dostáváme vstupní data kompatibilní s technologií Multimatrix®.

Dojem maticového umístění difrakčních mřížek s nastavovanou difrakční účinností s dosaženým dojmem jejich náhodným umístěním můžete porovnat.



Obrázek 3.5 Porovnání maticového napravo a náhodného rozmístění mřížek v levé části

3.7 ZÁVĚR

Největším přínosem celé práce s difrakčními mřížkami bylo umožnění přizpůsobit data pro elektronový litograf jeho aktuálnímu technickému stavu.

Druhé místo v přínosech má možnost generování geometricky optimalizovaných difrakčních mřížek zvolených parametrů s minimální expoziční náročností.

4 DIFRAKTIVNÍ STRUKTURY SE SKRYTÝM OBRAZEM

Fourierova transformace umožňuje návrh syntetického hologramu reliéfu difraktujícího světlo do více než jednoho bodu. Podmínkou jejího užití je Fraunhoferův popis šíření světla po odrazu nebo průchodu světla, který předpokládá pozorovatele nekonečně daleko od reliéfu; pro rekonstrukci obrazu by bylo ideální užití vlny monochromatického světla stejné homogenity v celém průřezu svazku o ploše větší než navrhovaný reliéf. Hledaným výstupem výpočtu je reliéf, vstupem je požadovaný obraz, oba jsou zastoupeny maticí komplexních čísel stejných rozměrů.

Syntetické hologramy exponované v EBL jsou fázovými hologramy. Odrazem nebo průchodem vlny v různých místech reliéfu dochází k fázovým posuvům a následně interferenci. Reliéf tedy nezmění amplitudu vlny. Rozdíl mezi požadovaným a rekonstruovaným obrazem je úměrný odchýlkám amplitud reliéfu od jejich průměrné hodnoty. Odchytky amplitud reliéfu je možné ovlivnit volbou fáze bodů požadovaného obrazu.

Ochranné prvky se skrytým odrazem jsou standardně navrhovány grafiky. Užívaný program s uzavřeným kódem postupuje v krocích:

1. úprava požadovaného obrazu difrakce pro zobrazení na plochem stínítku,
2. náhodná volba fáze bodů obrazu difrakce,
3. převedení obrazu difrakce na binární bitmapu a její uložení.

Binární bitmapa je exponována po jednotlivých bodech elementárními expozicemi se zvolenou konstantní velikostí. Počet elementárních expozic odpovídá jedné polovině plochy, jak vyplývá z analýzy provedené v **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**, ve zvoleném rozlišení. Velikost elementární expozice je nejčastěji volena 0,5 μm .

Potřeba zvýšit kvalitu obrazu difrakce přišla s myšlenkou realizace technologie umožňující jejich čtení elektrickým zařízením.

4.1 ÚPRAVA OBRAZU DIFRAKCE

Požadovaný obraz je před převodem nutno upravit z hlediska geometrického zkreslení zobrazením na plochem stínítku. Uvažován je dopad svazku monochromatického světla na reliéf kolmo. Geometrické zkreslení ovlivní polohu bodů a plochu, na které bude rozložena dopadající intenzita.

Požadovanou polohu bodu na stínítku $[x; y]$ ovlivní vzdálenost reliéfu od stínítka v , velikost struktury S a vlnová délka λ monochromatického světla užitého k rekonstrukci obrazu. Poloha bodu a vzdálenost stínítka od struktury by měla být do vztahů zadávána ve stejných jednotkách, stejně tak vlnová délka a velikost struktury. Polohu bodů $[X; Y]$ v převáděném obrazu je možno určit vztahem (4.1); je vztažena k nultému řádu difrakce a je bezrozměrná.

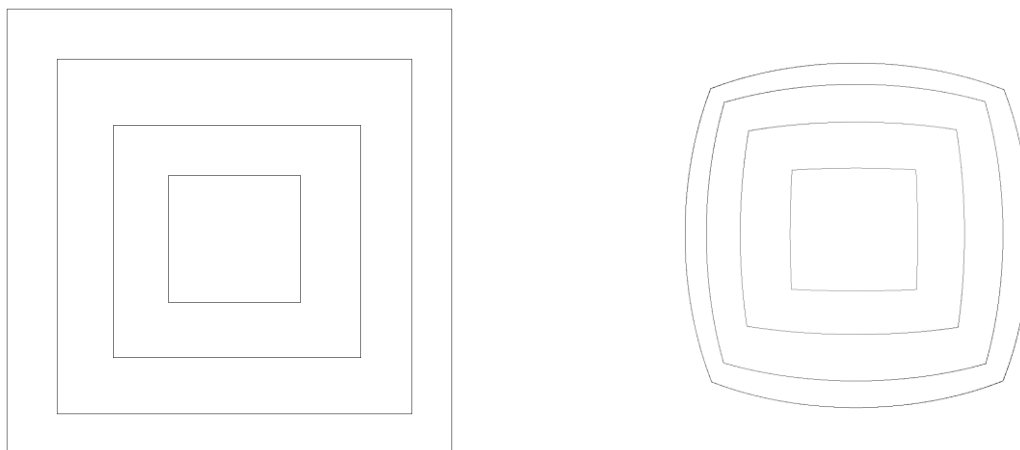
$$X = \frac{x \cdot S}{\lambda \cdot \sqrt{v^2 + x^2 + y^2}}; \quad Y = \frac{y \cdot S}{\lambda \cdot \sqrt{v^2 + x^2 + y^2}} \quad (4.1)$$

Vzdálenost bodů se zvyšuje se zvyšující se vzdáleností od nultého difrakčního řádu, intenzita bodů se rozkládá na různě velké ploše. Množství požadované

intenzity je proto upraveno v závislosti na velikosti plochy, na které je rozložena. Vzdálenost bodů je dána polohou okolních bodů, kterou určíme vztahem (4.2).

$$x = \frac{X \cdot v}{\sqrt{S^2/\lambda^2 + X^2 + Y^2}}; \quad y = \frac{Y \cdot v}{\sqrt{S^2/\lambda^2 + X^2 + Y^2}} \quad (4.2)$$

Vztahy (4.1) a (4.2) byly použity i pro vygenerování korekce zkreslení motivu difrakčního obrazu na Obrázek 4.1 a Obrázek 4.2, které jsou uvedeny za účelem objasnění významu úpravy motivu difrakčního obrazu před převodem na difraktivní strukturu.

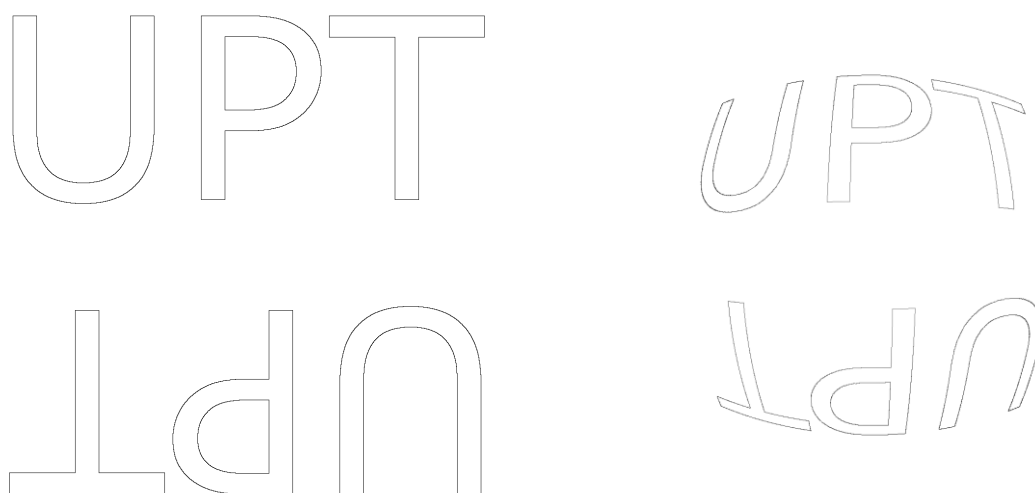


Obrázek 4.1 Úprava vzorového obrazu pro převod

Parametry zvolené pro převod byly: vlnová délka světla pro čtení obrazu $\lambda=550\text{nm}$, vzdálenost stínítka $v=55\text{mm}$, velikost obrazu na stínítku $S=100\text{mm}$ a velikost bodu generované struktury 300nm .

Z Obrázek 4.2 je patrné, že při malém úhlu difrakce dochází k zanedbatelným zkreslením. Návrh motivů velikosti, které byly umísťovány jen do těchto oblastí, bylo řešením před odvozením vztahů (4.1) a (4.2).

Praktický příklad použití je uveden na . Parametry uvedené pro příklad zobrazený na Obrázek 4.2 byly zachovány.



Obrázek 4.2 Úprava požadovaného obrazu pro převod

4.2 OPTIMALIZACE PŘEVODU OBRAZU DIFRAKCE METODOU ITERATIVNÍ FOURIEROVY TRANSFORMACE (IFTA)

Dosažení vysoké difrakční účinnosti i homogenity difraktovaného obrazu je možné vhodnou volbou fáze bodů požadovaného obrazu difrakce. Uspokojivých výsledků bylo dosaženo optimalizační metodou iterativní Fourierovy transformace, která je realizována v krocích:

1. požadovaný obraz je upraven nastavením náhodných fází,
2. požadovaný obraz je převeden inverzní Fourierovou transformací na reliéf,
3. reliéf je převeden na fázový (moduly bodů jsou normalizovány na 1),
4. je provedena simulace difrakce převodem Fourierovou transformací,
5. je vyhodnocena odchylka modulů simulovaného obrazu od požadovaného, je-li dostatečně malá, algoritmus je ukončen,
6. fáze bodů simulovaného obrazu jsou užity pro první krok jako vstupní.

Prvním řešeným úkolem byla volba podmínky ukončení algoritmu. Užívány jsou dva přístupy vyplývající z účinnosti a homogenity optimalizovaného obrazu.

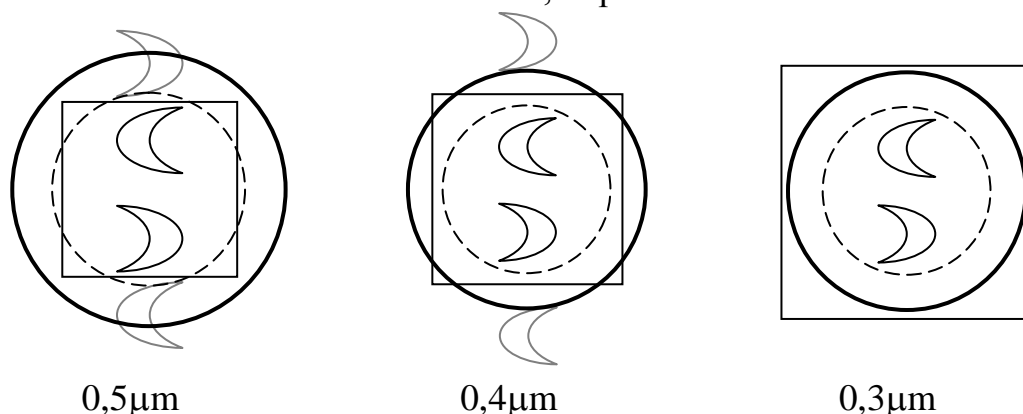
Dosažené výsledky byly zlepšeny zohledněním počtu úrovní exponované struktury již v průběhu výpočtu.

Posledním krokem zlepšování výsledků optimalizace byla implementace úpravy algoritmu IFTA publikované Prof. Richterem vycházející z myšlenky zachování šumu vně zvoleného okna, považovaného za kritické, a úpravou požadovaných bodů vynásobením koeficientem zvětšení.

4.3 PŘEVOD DIFRAKTIVNÍ STRUKTURY NA EXPOZIČNÍ DATA

Omezení minimální velikosti elementární expozice na čtverec o straně $0,5 \mu\text{m}$ bylo zvoleno za účelem snížení doby expozice. Důvodem návrhu difraktivních struktur ve vyšším rozlišení je především užívaná vlnová délka pro jejich rekonstrukci, která je cca 640 nm . Vliv volby rozlišení na podíl intenzity druhého řádu vyjadřuje Obrázek 4.3. Obraz difrakce je navržen pro binární strukturu; požadovaným motivem je měsíc; čtverec zachycuje poměr velikosti převáděné

matice ve vztahu k velikosti požadovaného obrazu difrakce; kružnice vyjadřují vzdálenost hranic úhlů 90° a čárkovaná 45° , dopadá-li svazek na reliéf kolmo.



Obrázek 4.3 Vliv volby rozlišení na podíl intenzity druhého řádu pro $\lambda = 640 \text{ nm}$

Uvedený příklad ukazuje výhody expozice reliéfů ve vyšším rozlišení. Za účelem snížení expoziční náročnosti byly navrženy tři algoritmy pro převod obrázků na expoziční data vycházející z různých myšlenek.

První algoritmus byl navržen pro struktury skládající se z téměř rovných čar. Myšlenkou algoritmu bylo:

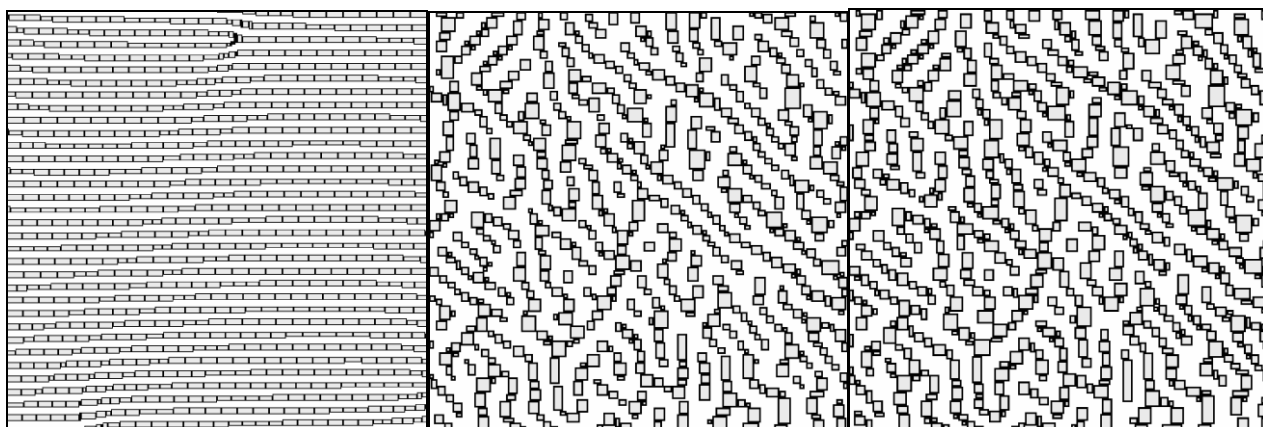
1. nalezení souvislé čáry,
2. vybrání částí stejné tloušťky,
3. rozdělení částí delších než maximální technologie povolená velikost elementární expozice na pokud možno stejně dlouhé části.

Byly užity následující metody pro dosažení lepších výsledků převodu:

1. přeuspořádání elementárních expozic v místech, kde se čáry dělí,
2. vypuštění elementárních expozic menších než je minimální povolená a náhrada většími,
3. úprava času expozice elementárních expozic v závislosti na jejich velikosti.

Druhý algoritmus byl navržen pro obecné struktury. Vychází z myšlenky vyhledávání vždy největší realizovatelné elementární expozice v převáděné bitmapě. Maximální velikost elementární expozice je dána jako vstupní parametr. Ztrácíme výhodu prvního algoritmu - dělení elementárních expozic větších než zvolený limit na pokud možno stejně velké části. Výstup algoritmu již zohledňuje vztah velikosti elementárních expozic a času jejich expozice. Samostatně realizovaným skriptem upravujícím výstup algoritmu bylo dosaženo snížení expoziční náročnosti. Časově méně náročnou verzí bylo přerozdělení elementárních expozic do subpolí o zvolené velikosti a eliminace elementárních expozic menších než zvolené minimum. Cíl druhé verze byl stejný; myšlenkou bylo exponovat pokud možno souvislé čáry. Řazení elementárních expozic umožnilo sdružování vypouštěných elementárních expozic většími. Nevýhodou druhé verze je zvýšení počtu instrukcí nastavujících čas expozice jednotlivých elementárních expozic.

Třetí navržený algoritmus umožňuje expozici elementárních expozic přesahující hranice vymezené převáděným obrázkem. Výstupy posledních dvou popsanych algoritmů je možno porovnat na Obrázek 4.4.



Obrázek 4.4 Výstupy postupně popisovaných algoritmů jsou seřazeny zleva doprava

Algoritmy byly publikovány **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..**

4.4 ZPRACOVÁNÍ VÍCEÚROVŇOVÝCH DIFRAKTIVNÍCH STRUKTUR SE SKRYTÝM OBRAZEM

Kroky postupu uvedeného v kapitole 4 jsou používány i pro zpracování víceúrovňových difraktivních struktur se skrytým obrazem. Obraz difrakce však nemusí být středově symetrický. Obraz je převeden na difraktivní strukturu, která pro používání eliminace malých expozic musí být v rozlišení nižším než v případě realizace binárních struktur. Difraktivní struktura je následně převedena na požadovaný počet úrovní, který musí být vyšší než dvě. Jednotlivé úrovně jsou nejčastěji exponovány samostatně s expozičními časy odpovídajícími požadované výšce reliéfu. Úrovně by však bylo možno realizovat také překrýváním elementárních expozic. Difraktivní struktura, simulace expozičních dat po převodu na čtyř-úrovňovou difraktivní strukturu a dosažený obraz difrakce je na Obrázek 4.5.



Obrázek 4.5 Difraktivní struktura, simulace expozičních dat a obraz difrakce zleva doprava

4.5 1D FFT A IFTA

Optimalizační metoda iterativní Fourierovy transformace je časově náročná. Časová náročnost vyplývá především z nutnosti počítat dvakrát v každé iteraci 2D Fourierovu transformaci. Myšlenkou zvýšení výpočetního výkonu proto byla náhrada 2D Fourierovy transformace její 1D verzí. Podmínkou použití byla poloha bodů difrakce na jediné lince. Využití našla u šterbinové mřížky, která je vhodná

pro grafické motivy viditelné z většího počtu úhlů. Další úspěšnou aplikací popsané metody bylo 2D/3D realizované syntetickými hologramy.

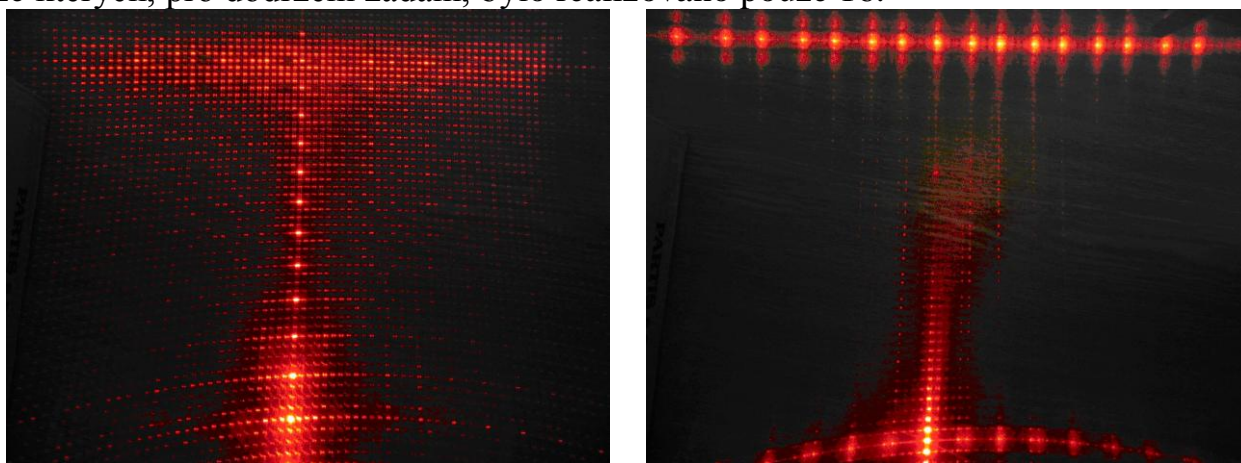
4.5.1 Štěrbínová mřížka

Reliéfem difraktujícím světlo do více bodů v linii je štěrbínová mřížka. Vstupem 1D IFTA je jednorozměrná matice, jejíž body zastupují obraz. Výstupem je matice bodů, jejichž fáze určují posun elementárních expozic v intervalu, jehož velikost odpovídá zvolené periodě. Body výstupní matice jsou sdružovány do elementárních expozic metodou odpovídající prvnímu popsanému algoritmu pro převod. Výstup převodu je kompatibilní s technologií eDirectTM i Multimatrix[®].

4.5.2 2D/3D, 3D realizované syntetickými hologramy

Expozice difraktivní struktury difraktující světlo do všech požadovaných směrů zajistila, v porovnání s kombinací více difrakčních mřížek v jednom místě plochy hologramu, zvýšení rozlišení grafiky a odstranění parazitních bodů difrakce. Vztah rozlišení a počtu úhlů pohledu zůstává beze změny; je proto často výhodné zvolit nižší rozlišení a definovat více různých grafik pro jednotlivé úhly pohledu. Výhodou volby nižšího rozlišení je také vyšší množství různých realizovatelných intenzit, kterým odpovídají počty exponovaných čar.

Při zachování vstupního parametru velikosti difraktivní struktury bylo možné realizovat v rozsahu odpovídajícímu minimálnímu a maximálnímu úhlu natočení mřížek použitých v maticově seřazeném zadání 71 různých úhlů natočení, ze kterých, pro dodržení zadání, bylo realizováno pouze 16.



Obrázek 4.6 Difrakce na maticově umístěných mřížkách vlevo a symetrickém hologramu

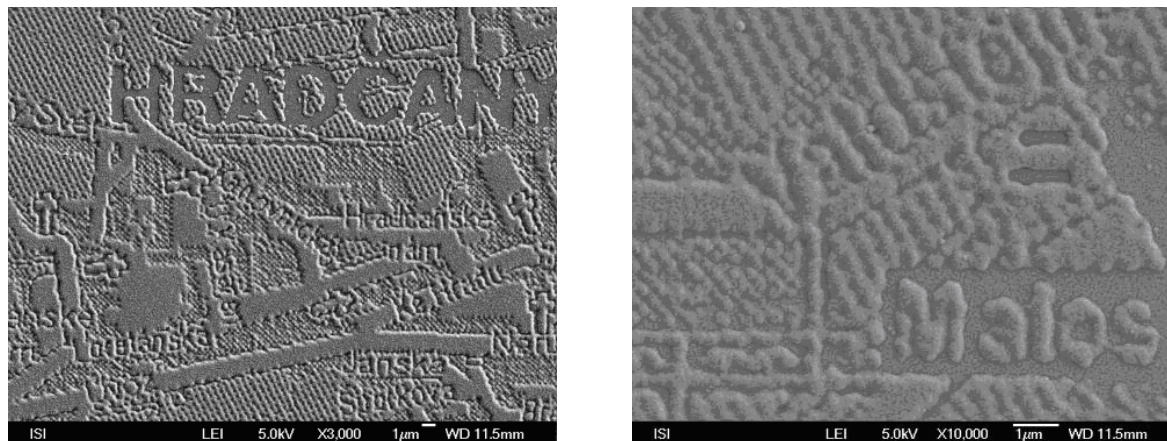
Popsané postupy byly úspěšně využity i pro 3D hologramy.

4.6 ZÁVĚR

Především vysoká expoziční náročnost vedla k požadavku na vytvoření nástroje pro převod obecných bitmap na expoziční data pro elektronový litograf. Nástroje byly vypracovány v úpravách pro převod bitmapy popisujících:

- difraktivní struktury blízké mřížkám se sklonem 0°
- obecné struktury s možností volby rozlišení až do rozlišení litografu
- nedifraktivní struktury velikosti přesahující expoziční okno litografu

Algoritmus pro nedifraktivní struktury byl použit i pro generování dat mapy Prahy při expozici hologramu popsaného v publikaci **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**



Obrázek 4.7 Obrázky z elektronového mikroskopu ve zvětšení 3.000 a 10.000

5 ZONÁLNÍ STRUKTURY

Pod pojmem zonální struktury rozumíme difrakční struktury, které obecně nemusí mít zřejmou periodicitu v Kartézské soustavě. Typickým příkladem je Fresnelova (zonální) čočka, patří sem rovněž kruhová mřížka.

Na difrakčním diagramu nalezneme vždy obraz odpovídající derivaci rovnice popisující zvolenou plochu. Pro příklady uvedené na **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** to budou pro rovinu průmět svazku, pro kouli kruh a pro kužel mezikružít. Podmínkou získání očekávaného obrazu difrakce je však zajištění dopadu svazku světla na celou plochu difrakční struktury.

Zonálním strukturám je možné se přiblížit diskrétním maticovým přístupem, kdy jednotlivé části Fresnelovy struktury jsou nahrazeny segmenty vyplněnými jednoduchými mřížkami s odpovídajícími parametry. Platí však následující: požadavek na vysoké rozlišení motivů, požadavek na malou velikost segmentu, není možné dosáhnout návaznosti v čarách, oblasti s prudkou změnou parametrů nelze přesně aproximovat, oblasti s dlouhou periodou nelze přesně aproximovat.

Tato poznámka se týká možnosti realizovat zonální struktury jinými přístupy. Vhodně zvolená zonální struktura tedy představuje silný bezpečnostní prvek. V této souvislosti můžeme podotknout, že zonální bezpečnostní prvky použité v technologii Multimatrix byly vcelku ojedinělým a význačným motivem. Jedná se o prvky označované SOE (speciální optický element, zonální kužel, kruhová mřížka) a LEN (Fresnelova zonální čočka).

5.1 VÝCHOZÍ STAV ŘEŠENÍ

Abychom vysvětlili význam prací popsaných dále v této kapitole, bude vhodné nejprve shrnout výchozí stav řešení problematiky (k roku 2002) a jeho omezení.

Při popisu se omezíme na dva základní případy již dříve zmíněné, tedy SOE a LEN. Při vytváření těchto struktur se využívalo makroinstrukcí jazyka Asbest **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** pro vykreslení kružnice a mezikružít.

Pojmu kružnice zde používáme pro úzká mezikruží, jehož šířka je menší než maximální velikost elementárních expozic, jimiž je mezikruží vyplněno; kružnice (KRT) je tedy tvořena posloupností sousedících elementárních expozic. Naproti tomu mezikruží (KRU) je širší a příčně je tvořeno více elementárními expozicemi.

Ohraničení oblasti vyplněné zonální strukturou je dáno vnější vykreslenou čarou (kružnice resp. mezikruží) nebo dosahem vychylování v rámci jednoho expozičního pole (čtverec případně obdélník). Jiné tvary nejsou jednoduše realizovatelné.

5.2 CÍLE A ŘEŠENÍ

Požadavkem bylo odstranění stávajících omezení a rozšíření o nové možnosti

- zobecnění ohraničení oblasti zonální struktury
- zobecnění definice zón
- off-line přístup (data jsou zkompileována před spuštěním expozice)
- hierarchie expozice (expoziční pole a expoziční okna)
- ošetření jevu rozptylu elektronů
- rozšíření možností generovaných difraktivních Fresnelovských struktur o deformace generovaných čar

Řešením byl algoritmus využívající především výhody možnosti definice tvaru exponovaných křivek rovnicemi pro dosažení minimálního počtu elementárních expozic při zachování maximální přesnosti tvaru křivky.

Výstupem algoritmu jsou soubory s daty pro jednotlivá expoziční pole, ve kterých jsou elementární expozice křivek seřazeny návazně v oblastech expozičních oken.

5.2.1 Vstupy algoritmu

Vstupy algoritmu jsou definice

plochy exponovaných struktur zadaná obrázkem, nazývaným maska, barev v obrázku s přiřazením označení ostatním vstupům algoritmu, velikosti bodu obrázku v jednotkách litografu, polohy středu kartézské soustavy na obrázku, rovnic křivek*, velikosti expozičního pole, velikosti expozičního okna, maximální velikost strany obdélníku elementární expozice, minimální velikost strany obdélníku elementární expozice, dosahu elektronů způsobený jejich rozptylem.

*) Pro generování rovnic křivek byly použity pouze kružnice. Pro jejich generování byla nutná definice

rovnic rozvoje parametrů křivek (pro kružnici jím byly rozvoje vzdáleností definovaných křivek v závislosti na vzdálenosti od středu),

rovnic zkreslení**,

rovnic rozvoje parametrů rovnic zkreslení

**) byly zadávány odlišné rovnice zkreslení pro různé části kružnice, což vycházelo z požadavku návrháře hologramu na výsledný tvar. V realizovaném případě jím byla závislost vzdálenosti právě zpracovávané elementární expozice

od středu difrakční Fresnelovské struktury a úhel její polohy vůči horizontální ose v kartézské soustavě.

5.2.2 Postup algoritmu

V následujícím postupu budou popsány pouze podstatné kroky algoritmu, budou eliminovány především kroky zajišťující návaznost křivek mezi jednotlivými poli.

Algoritmus cyklicky opakuje:

- 1 pro všechna expoziční pole vyhodnocení nutnosti zpracování spočívající v nalezení alespoň jednoho bodu barvy, pro kterou jsou definovány další parametry Fresnelovských struktur,
- 2 pro všechna expoziční pole expozičního okna opakuje vyhodnocení nutnosti jeho zpracování,
- 3 pro každou křivku v expozičním poli opakuje
 - 3.1 určení částí kružnice, ve kterých bude počítána a pro každou elementární expozici opakuje výpočet polohy elementární expozice*
 - 3.1.1 kontrola je-li naposled určená poloha elementární expozice v oblasti expozičního pole a byla-li určena odpovídajícím algoritmem,
 - 3.1.1.1 výpočet bodů křivky dokud se shoduje určovaný z parametrů polohy bodů nebo počet určených poloh bodů nedosáhl definované minimální velikosti elementární expozice,
 - 3.1.2 porovnání počtu vypočtených hodnot s maximální velikostí elementární expozice,
 - 3.1.2.1 rozdělení vypočtených bodů do více elementárních expozic o pokud možno stejné velikosti, přesahuje-li jejich počet maximální stanovenou velikost elementární expozice,
 - 3.2 pro všechny vypočtené elementární expozice opakuje,
 - 3.2.1 výpočet průměrné hodnoty určených bodů a její zaokrouhlení,
 - 3.2.2 kontrolu nutnosti exponovat vypočtenou elementární expozici,
 - 3.2.3 výpočet šířky exponované křivky,
 - 3.2.4 určení délky expozičního času elementární expozice, porovnání s naposled užitou hodnotou a v případě neshody odeslání nastavení požadované délky expozičního času na výstup,
 - 3.2.5 uložení elementární expozice do listu elementárních expozic v určeném expozičním okně.
 - 4 uložení dat všech expozičních oken do souboru expozičního pole

*) V bodě 3.1 bylo zmíněno dělení kružnic na části, ve kterých jsou polohy jednotlivých elementárních expozic určovány odlišnými algoritmy a v bodě 3.1.1 je zmíněna kontrola správnosti použití daného algoritmu. Rozdělení vyšlo ze zkušeností nabytých při návrhů algoritmu pro generování difrakčních mřížek. Pro snížení časové náročnosti výpočtu jsou určovány pouze polohy bodů, které jsou použity pro určení polohy a velikosti elementární expozice. Šířka čáry je odvozována, stejně jako tomu bylo u přímek, z šířky periody, proto šířka periody musí být vždy menší než rozdíl algoritmem určované ze souřadnic poloh elementárních expozic. Pro případ binárních difrakčních mřížek stačila kontrola

sklonu generované mřížky. Byl-li sklon větší než 45° , byly osy kartézské soustavy při výstupu zaměněny. Cílem popisovaného generátoru deformovaných kružnic byla i plynulá návaznost sousedících elementárních expozic. Proto byly jednotlivé části generátoru psány jako oddělené algoritmy a bylo možno každému zadat specifickou rovnici deformace.

5.2.3 Ukázka

Možnosti algoritmu budou představeny na zjednodušeném příkladu. Zjednodušení spočívá především v zadání, které omezí vstupní parametry tak, aby výstup bylo možné zobrazit na jediném obrázku a přitom bylo znázorněno co nejvíce z popsanych rozšíření.

Stanoveného cíle možnosti zobrazení na jediném obrázku bylo dosaženo volbou velikosti strany exponované plochy čtvercového tvaru $100\mu\text{m}$. Plocha exponované plochy odpovídá i velikosti zadané masky ve zvoleném rozlišení. Maskou byl zvolen obrázek s na první pohled zřetelným motivem.

Hodnoty periody p byly voleny v intervalu $\langle 600; 1600 \rangle$ nm. Pro rozvoj periody p byla zvolena funkce (5.1).

$$p = 6 \cdot e^{|\sin(k)|} \quad (5.1)$$

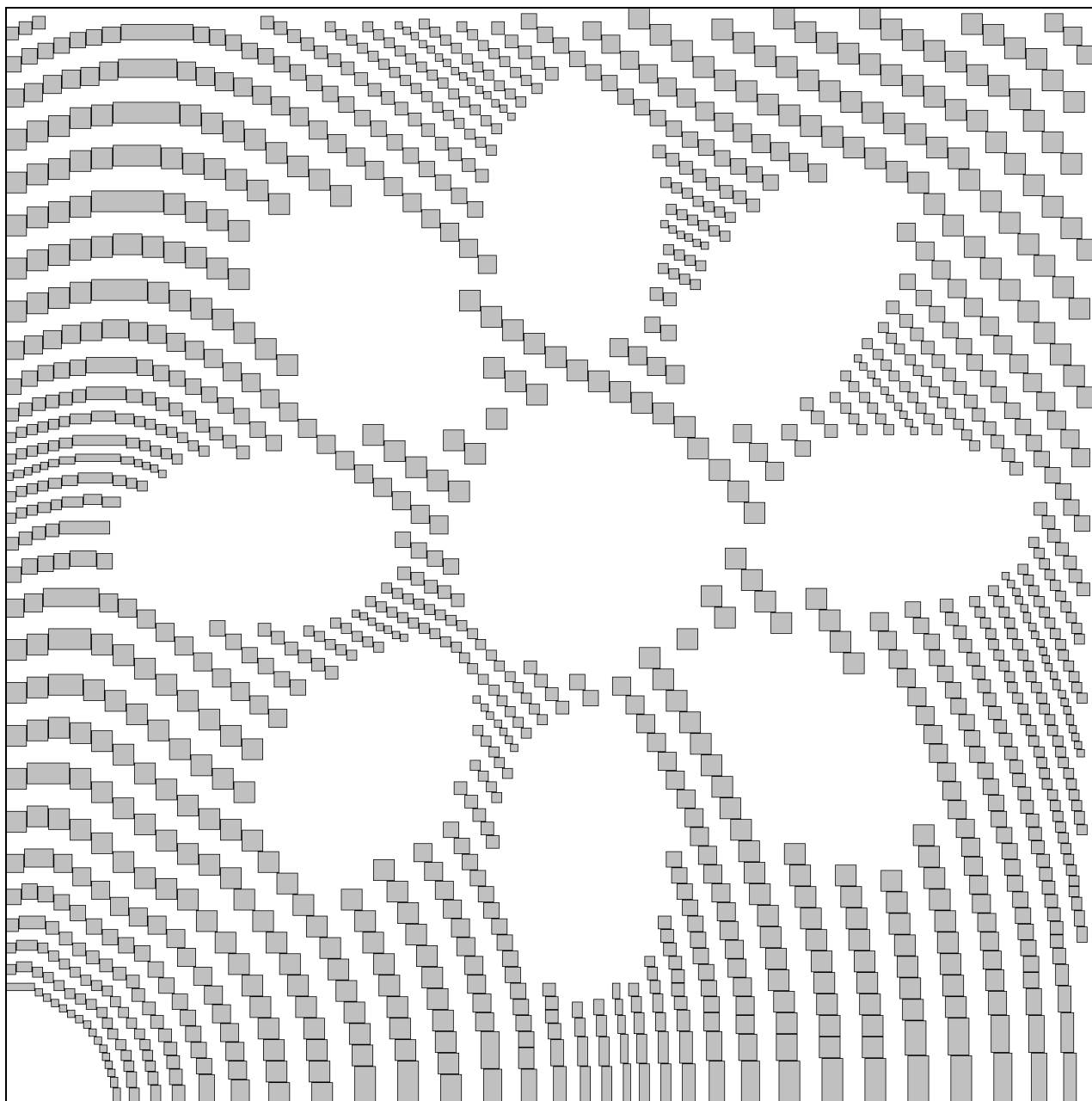
Parametr k se ve vztahu (5.1) zvyšuje lineárně podle vztahu (5.2), ve kterém parametr n odpovídá číslu generované čáry (počítáno od nuly).

$$k = n \cdot \pi/16 \quad (5.2)$$

Deformace byla zadána pouze pro část kružnice, kde je počítán horizontální parametr polohy elementární expozice y .

$$y = y \cdot \{1 + 0.05 \cdot \sin[8 \cdot a \sin(x/r)]\} \quad (5.3)$$

Výstupu algoritmu s uvedenými parametry zadání je uveden na Obrázek 5.1.



Obrázek 5.1 Ukázka výstupu algoritmu dokumentující jeho možnosti

5.3 ZÁVĚR

Zonální struktury byly úspěšnou aplikací nabytých znalostí. Algoritmus použitý pro generování zonálních struktur využívá výhod znalosti matematického popisu čar, ze kterých difraktivní struktura sestává, ale díky možnosti zadat deformace neomezuje čáry pouze na jednoduchý geometrický tvar, kterým je v popsaném případě kružnice. Znalost matematického popisu čar umožňuje snížení počtu elementárních expozic na minimálně možný a současně přináší možnost zohlednění aktuálního technického stavu elektronového litografu.

Při řešení bylo uvažováno dělení elementárních expozic do expozičních polí za účelem zajištění minimálního expozičního času, které bylo v předchozích kapitolách práce užito pouze v úpravě algoritmu pro převod obecných bitmap

na expoziční data elektronového litografu ve verzi pro nanografiky, kde muselo být počítáno s rozsáhlejšími vstupy.

Z hlediska výstupu je v celé popisované práci naprosto jedinečný zápis do binárních souborů vynucený počtem generovaných instrukcí.

Možnost maskování byla prvním z požadavků, který celou práci na vývoji nástroje pro generování zonálních struktur vyvolal, a proto je ji možno považovat za největší přínos z hlediska návrhu hologramů.

Využitelnost zonálních struktur je i v oblasti technické. Čočky realizované v EBL již našly využití i v optice.

Zonální struktury spadají pod patent **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** společnosti Optaglio Ltd.

Shrnutí zvolených způsobů pro dosažení stanovených cílů:

- zobecnění ohraničení oblasti zonální struktury bylo dosaženo umožněním volby plochy, na které je Fresnelovská struktura generována, což přináší nejen zobecnění ohraničení, ale také možnost vložit kamkoli do plochy generované Fresnelovy struktury mezeru nebo dokonce jinou difraktní strukturu,

- zobecnění definice zón bylo dosaženo umožněním definovat změnu vzdálenosti jednotlivých kružnic rovnicemi, což umožňuje například nadefinovat Fresnelovskou strukturu, která bude vypadat jako hladina vody ve chvíli, kdy na ni dopadá kapka,

- off-line přístup je používán v celé disertační práci; data generovaná pro Fourierovské difrakční struktury však dosahovala počtů elementárních expozic v tisících; s nutností generovat data pro Fresnelovské difrakční struktury, kde se počty generovaných elementárních expozic pohybovaly při velikosti exponované plochy v desítkách milimetrů, ve stovkách milionů, přišla nutnost snížit objem dat; poprvé byl použit binární výstup algoritmu, čímž jsme ovšem ztratili výhody možnosti snadných úprav,

- hierarchie expozice bylo dosaženo návrhem postupu algoritmu,

- ošetření jevu rozptylu elektronů bylo dosaženo zavedením možnosti definice dosahu elektronů rozptýlených při dopadu, které ovlivňuje přímo šířku exponované křivky a zahrnutím určení expozičního času elementární expozice z velikosti stran obdélníku elementární expozice,

- deformace ploch difraktních Fresnelovských struktur byla dosažena užitím rovnic popisujících deformaci při výpočtu polohy bodu.

6 VELKOPLOŠNÉ STRUKTURY

Velkoplošné struktury jsou exponované difraktní struktury, jejichž velikosti dosahují řádu cm^2 , složené z mnoha expozičních polí velikostí řádu mm^2 . Cílem bylo dosažení zvýšení dojmu homogenní difraktní struktury.

Během studia byl vyvinut nástroj pro kalibraci expozičního pole litografu zkracující dobu kalibrace z řádu dnů na minuty. Úspěšná kalibrace expozičního pole zajistila návaznost vedle sebe ležících expozičních polí. Snížení rozeznatelnosti jednotlivých expozičních polí s nehomogenní účinností v jejich různých částech bylo dále rozšiřováno. Oba problémy budou odděleně popsány.

6.1 KALIBRACE VYCHYLOVACÍHO POLE ELEKTRONOVÉHO LITOGRAFU BS600

Kalibrace geometrie vychylovacího pole litografu byla řešena již při jeho vzniku. Původní řešení kalibrace bylo hardwarové a bylo založeno na řešení matice rovnic vyššího řádu, protože bylo navrhováno pro expoziční pole velikosti 6,4 mm. Přestavba litografu koncem 90. let, odřezání původního řešení kalibrace z důvodu nízké spolehlivosti (nalezení značky při mechanických problémech při různých hodnotách proudu ve svazku - signálu sekundárních elektronů) vedlo k náhradě hardwarové kalibrace nejdříve "ručním" postupem složeným z kroků expozice, vyvolání, změření odchylek, výpočet kalibračních odchylek a jejich použití pro další expozici. Byly testovány různé metody kalibrace a matematické modely zkreslení vychylovacího pole. V současnosti používaný matematický model, předpokládající dostatečnou linearitu zkreslení při velikostech vychýlení svazku v prakticky používaných velikostech expozičního pole, a proto dělicí kalibrované expoziční pole jen na čtyři kvadranty, byl prakticky ověřen. K velké změně v postupu kalibrace došlo až po umožnění využití videokamery a REM módu, kdy byl celý postup kalibrace automatizován, čímž bylo dosaženo především výrazného snížení doby potřebné ke kalibraci.

6.1.1 Matematický model

Kalibrace je prováděna úpravou napětí vychylovacích cívek v závislosti na cílové poloze svazku dle dvourozměrného polynomu druhého řádu, který je zde uveden po přepsání do maticového tvaru:

$$\begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_x & B_x & C_x & D_x \\ A_y & C_y & B_y & D_y \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ X \\ Y \\ X \cdot Y \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

Změříme-li odchylky $\Delta X, \Delta Y$ ve čtyřech bodech expozičního pole, lze vypočítat kalibrační koeficienty A_x, \dots, D_y dle rovnice (6.2)

$$\begin{bmatrix} A_x & B_x & C_x & D_x \\ A_y & C_y & B_y & D_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X_1 & \Delta X_2 & \Delta X_3 & \Delta X_4 \\ \Delta Y_1 & \Delta Y_2 & \Delta Y_3 & \Delta Y_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ X_1 & X_2 & X_3 & X_4 \\ Y_1 & Y_2 & Y_3 & Y_4 \\ X_1 \cdot Y_1 & X_2 \cdot Y_2 & X_3 \cdot Y_3 & X_4 \cdot Y_4 \end{bmatrix}^{-1} \quad (6.2)$$

6.1.2 Zpracování

Kalibrace je provedena ve třech krocích: 1. sejmutí obrázků značek v REM módu ve všech čtyřech rozích každého z kvadrantů, 2. vyhledání středů všech značek, 3. výpočet korekčních odchylek. Odchylky jsou odečítány z polohy dříve naexponovaných pokovených značek umístěných na rámečku s uchyceným substrátem. Substrát, na který je exponována struktura, a značky sloužící pro kalibraci nejsou ve stejné výšce, což bylo nutné pro zvýšení přesnosti kalibrace ve výpočtu zohlednit. Obrázky jsou snímány skriptem (Visual Basic Skript) bez nutnosti zásahu operátora. Skript je možno použít ve dvou režimu s pojezdem

stolu a bez pojezdu stolu. Použití varianty bez pojezdu stolu je podmíněno použitím sady značek naexponovaných v požadovaných vzdálenostech a následným použitím korekce přesnosti polohy těchto značek. Přesto, že by výhodou kalibrace bez pojezdu stolu byla úspora času, není dosud žádná sada značek dostatečně dobře zdokumentována. Obrázky jsou snímány při nejvyšším použitelném zvětšení, které je dáno především předpokládanou velikostí odchylek, ale také velikostí značky; jeden bod odpovídá 0,1 μm . Obrázky jsou velikosti 512×512 bodů, odchylky tedy mohou přesahovat i 20 μm .

Obrázky je nutno po sejmutí analyzovat. Analýza spočívá v nalezení středu značky. Pro analýzu obrázků i následný výpočet kalibračních koeficientů výše uvedené rovnice bylo zvoleno prostředí MATLAB.

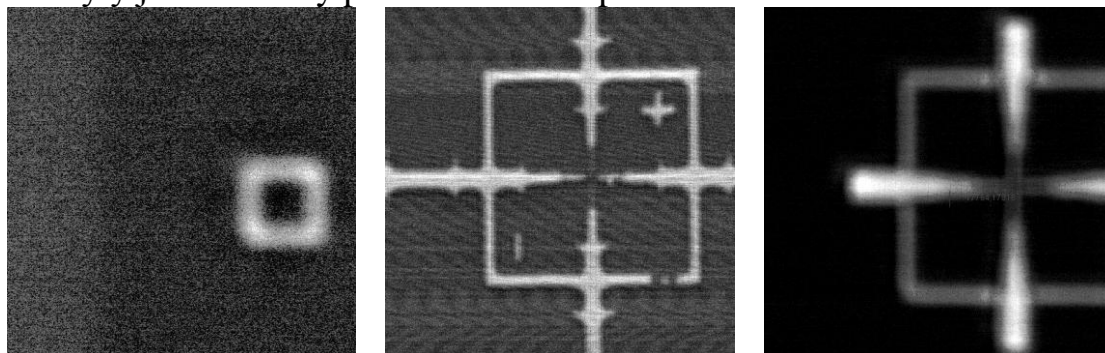
6.1.3 Funkce pro analýzu obrazu

Cílem analýzy je nalezení souřadnic středu značky v obrázku. K vyhledání je využito vlastností prvního řádu Fourierovy transformace. Vztah pro výpočet přímé diskrétní Fourierovy transformace:

$$D(n) = \sum_{k=0}^{N-1} d(k) e^{-ink2\pi/N} \quad (6.3)$$

Algoritmus Fourierovy transformace je uplatněn na součty bodů obrázku v horizontálním a vertikálním směru. Souřadnice polohy značky odpovídají úhlu komplexních čísel prvního řádu Fourierovy transformace každého ze součtů.

Značky mohou mít různý tvar a obraz může být zatížen různým zkreslením, což dokumentuje Obrázek 6.1, na kterém jsou stolová, křížová odměřovací a rámečková značka. Při snímání obrázků je nutné, aby parametry optické soustavy litografu byly již nastaveny pro následnou expozici.



Obrázek 6.1 Zleva značky stolová, křížová odměřovací a rámečková a jejich možná zkreslení

Pro odstranění šumů z obrázku je implementován filtr, který nastaví hodnotu všech bodů v obrázku, jejichž hodnota není vysoká alespoň jako zvolená proměnná, na nulovou, ostatním přiřadí hodnotu jedna. Pro snížení množství informace v součtech v horizontálním a vertikálním směru je implementován filtr, který nastaví hodnotu všech bodů v řadě, jejichž hodnota není vysoká alespoň jako zvolená, na nulovou, hodnotu ostatních zachová. Pro vyhlazení obrazu před odstraněním šumu je implementován filtr, který převede diskrétní dvourozměrnou Fourierovou transformací definovanou vztahem (6.4)

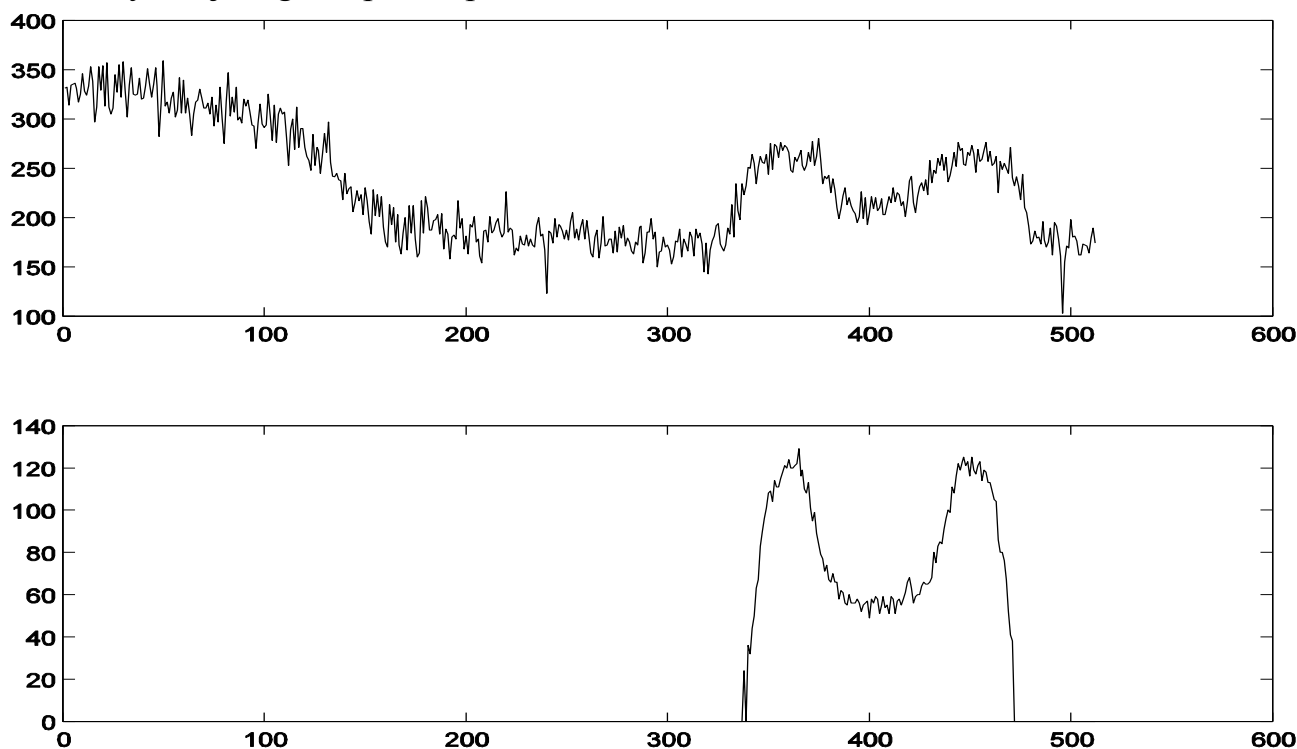
$$F(u, v) = \sum_{x=0}^{m-1} \sum_{y=0}^{n-1} f(x, y) e^{-j2\pi \left(\frac{ux}{m} + \frac{vy}{n} \right)} \quad (6.4)$$

obrázek do frekvenční oblasti odpovídající velikosti frekvenčního pravoúhelníku o straně odmocniny z velikosti vstupního obrázku a převede jej zpětnou diskretní dvourozměrnou Fourierovou transformací definovanou vztahem (6.5)

$$f(x, y) = \frac{1}{mn} \sum_{u=0}^{m-1} \sum_{v=0}^{n-1} F(u, v) e^{-j2\pi \left(\frac{ux}{m} + \frac{vy}{n} \right)} \quad (6.5)$$

zpět na obrázek o velikosti původního obrázku. Poslední popsany filter může ovlivnit výběr poprvé popsany filterm natolik, že je vhodné vrátit se zpět ke vstupním hodnotám obrázku, proto byl popsany filter implementován a je spouštěn, je-li požadován, před sečtením horizontální a vertikální řady.

Pro dokumentaci práce implementovaných filterů a požadovaného výsledku práce s nimi slouží graf na Obrázek 6.2, které jsou výstupy horizontálního součtu snímků stolové a rámečkové značky uvedených na Obrázek 6.1. Pro porovnání rozdílů jsou zobrazeny dvojice grafů před a po filtraci.



Obrázek 6.2 Ukázka práce filtru na stolové značce

6.1.4 Podpůrné funkce

Výstupy výše uvedené funkce je nutno dále zpracovat. Práci s odchylkami a kalibračními koeficienty usnadňuje sada podpůrných funkcí řešících:

- převod polohy středů na odchylky
- změnu hodnot odchylek při posunu v ose z
- vykreslení odchylek
- výpočet kalibračních koeficientů

- zápis kalibračních koeficientů do souboru
- načtení odchylek ze souboru kalibračních koeficientů
- načtení odchylek ze souboru odchylek

6.1.5 Korekce odečtených odchylek

Snímané značky, jak již bylo uvedeno, nejsou naexponovány na substrátu, který je použit pro expozici. Oba substráty jsou umístěny v téměř stejné výšce, přesto i malá odchylka má vliv na výslednou velikost zkalibrovaného expozičního pole. Odchylka je kompenzována výpočtem. Vstupními parametry výpočtu jsou velikost expozičního pole a rozdíl vzdálenosti analyzované značky a substrátu pro expozici, který je určen pokusem. Odchylky značek snímaných bez pojezdu stolu jsou zatíženy chybou pojezdu stolu. Při expozici matice značek byla chyba zkreslení vychylovacího pole eliminována náhradou vychýlení svazku pojezdem stolu. Poloha stolu je určována laserovým interferometrem s přesností 0,1 nm, odchylka aktuální polohy stolu od požadované je opět kompenzována vychýlením svazku. Chyba pojezdu stolu však nesmí překročit předem stanovenou hodnotu v řádu desítek mikrometrů. Odchylky expozice byly opakovaně odečteny pomocí REM a statisticky zpracovány – tyto hodnoty však bylo nutné opět upravit dle výsledků expozice.

6.1.6 Výsledky kalibrace

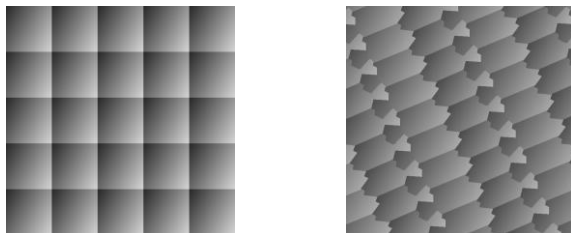
Kvalitu kalibrace udává návaznost expozičních polí. Návaznost expozičních polí se však obtížně vyhodnocuje, protože v nejčastěji exponovaných difraktivních strukturách je možno chyby návaznosti expozičních polí jen obtížně odečíst, chyby se v průběhu expozice mohou s měnícími se podmínkami měnit a vždy jsou zatíženy již dříve popsanou chybou pojezdu stolu. Pro hodnocení kvality kalibrace byly tedy v průběhu let vyvinuty speciální obrazce. Na v současnosti používaném obrazci jsou odchylky zkreslení geometrie expozičního pole v rastru teček s krokem 2 μm obklopených stupnicemi doplněných ukázkou návaznosti expozičních polí po pravé straně, více viz. **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**; exponovaný vlevo bez a vpravo s kalibrací. Barevnost obrázků je dána stupněm v technologickém procesu. Kalibrační obrazec zobrazený vlevo je po vyvolání a vpravo již po pokovení.

Jinou možností kontroly správnosti kalibračních konstant je sejmutí značek s kalibrací. Tato kontrola může odhalit chybu odečtení odchylky, kvalitu kalibrace však neovlivní.

6.2 DĚLENÍ GRAFICKÉHO MOTIVU NA POLE OBECNÉHO TVARU

Vychylovací pole litografu je omezeno velikostí. Omezení je dáno požadavkem na stabilitu zkreslení geometrie. Proto je z praktických důvodů používána velikost expozičního pole 3,2 mm. Podotkneme, že novější litografy mají velikost expozičního pole zpravidla výrazně menší (50 až 100 μm). Grafické motivy přesahující velikost expozičního pole musí být rozděleny na menší části a exponovány postupně. Přirozeným a nejjednodušším způsobem dělení obrazu na menší části jsou čtvercová resp. obdélníková pole.

Ani úspěšnou kalibrací vychylovacího pole litografu nemusí být odstraněna různá hustota elektronů při vychýlení svazku do různých směrů. Snížení rušivého dojmu, který je především patrný na jednobarevných plochách velikosti přesahující zvolenou velikost expozičního pole, může být dosaženo dělením grafického motivu na pole tvaru obecného, viz. Obrázek 6.3.



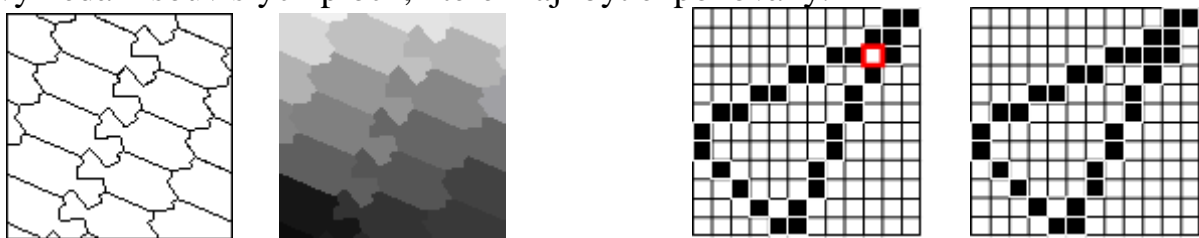
Obrázek 6.3 Rozdíl rušivého dojmu na ploše dělené čtvercově nalevo a obecně napravo

Postup dělení grafického motivu na pole obecného tvaru je dále v textu rozdělen na pět kroků. Všechny popsané kroky postupu s výjimkou prvního byly automatizovány použitím programovacího prostředí Matlab.

Prvním krokem postupu je návrh motivu masky. Masku se musí skládat z polí menších než maximální technologie povolená velikost expozičního pole, nejlépe však z polí velikosti co možná nejbližší kalibračnímu motivu, pro snížení pravděpodobnosti vzniku zkreslení. Ze stejného důvodu je vhodné navrhovat tvar jednotlivých expozičních polí co možná nejbližší čtvercovým. Masku expozičních polí je vhodné navrhovat ve vektorovém grafickém formátu, který umožňuje export do bodových grafických formátů ve zvolených rozlišeních.

Vektorové masky vyexportované do černobílých bitmap s čarami bodové tloušťky je nutno převést na matice hodnot popisující polohu a velikost hranic jednotlivých expozičních polí a vlastní motivy expozičních polí masky.

Druhým krokem postupu dělení grafického motivu na obecně ohraničená expoziční pole je převod masky na matice, viz. levá část Obrázek 6.4, a je založen na vyhledání souvislých ploch, které mají být exponovány.



Obrázek 6.4 Masky a motivy expozičních polí a převod samostatných bodů na body hranic

Protože velikosti makropixelu při použití technologie Multimatrix[®] mohou dosahovat velikostí, které jsou pod lupou viditelné, je vhodné exponovat i hranice masky. Algoritmus pro vyhledání souvislých ploch pozadí ověřuje, mají-li horizontálně a vertikálně sousedící body stejnou hodnotu. Je-li sousedícím bodem hranice, je přijata jako součást maskovaného motivu a je ověřeno, jsou-li i nejbližší horizontálně, vertikálně i diagonálně sousedící body součástí hranice, což umožňuje expozici hranic masky silnějších než jeden bod. Převod samostatných bodů pozadí na body hranic, vyjádřený v pravé části Obrázek 6.4, se stává řešením pro odstranění

zbytečných pojezdů stolů. Již v tomto kroku je možno zvolit pořadí expozice jednotlivých expozičních polí. Je jím pořadí hodnot v poli popisujícím velikost hranic jednotlivých expozičních polí, kterým odpovídá užitá barva polí masky.

Třetím krokem postupu je kontrola a změna pořadí expozice jednotlivých expozičních polí v případě potřeby. Pořadí jednotlivých expozic určuje vazební soubor, který je vytvářen v pátém kroku postupu. Je vhodné provést kontrolu i změnu pořadí expozic jednotlivých expozičních polí již po vytvoření matice popisující polohu a velikost hranic jednotlivých expozičních polí. Výhodou je především možnost vizuální kontroly pořadí jednotlivých expozičních polí bez nutnosti simulace expozice.

Čtvrtým krokem postupu je vlastní dělení skládající se z výběru čtvercových oblastí stejných velikostí těsně ohraničujících vybrané expoziční pole v poli masky a poli motivu. Vybraná část pole masky je převedena na binární tak, aby hodnota části, kterou chceme exponovat, byla jedna. Binarizovanou maskou je pak vynásoben požadovaný motiv.

Pátým krokem je vytvoření vazebního souboru popisujícího mimo jiné pořadí expozice jednotlivých expozičních polí, který se skládá převážně z příkazů pojezdů stolů a příkazů určujících polohu počátku souřadnicové soustavy pro příkazy vlastní expozice. Expoziční pole je kalibrováno vzhledem ke středu vychylovací soustavy, umístění exponovaného motivu je proto nejvýhodnější na střed. Velikost jednotlivých expozičních polí se obecně může lišit, proto je s ní nutno počítat při určování polohy počátku souřadnicového systému a velikosti pojezdů stolu.

6.3 ZÁVĚR

Rozšíření elektronového litografu BS600 o možnost čtení obrazu v režimu rastrovacího elektronového mikroskopu přinesla možnost kalibrace expozičního pole před vlastní expozicí i při přerušení expozice v jejím průběhu. Časová náročnost procesu kalibrace expozičního pole elektronového litografu se snížila z hodin na minuty. Pro automatizaci procesu kalibrace byl požadován nástroj, který byl realizován podle zadání operátorů elektronového litografu.

Kalibrace expozičního pole elektronového litografu před expozicí přinesla zvýšení návaznosti sousedících expozičních polí.

Homogenita difraktivní struktury se však může při různém vychýlení svazku lišit i při expozici stejných expozičních dat. Homogenita výsledku expozice odpovídá technickému stavu elektronového litografu, který je obtížné předvídat zejména po výměně katody. Požadavek na produkci zakázek aktuální technický stav elektronového litografu nezohledňuje, a proto byla hledána jiná řešení. Rozdělení expozice na expoziční pole obecného tvaru se stalo na několik týdnů řešením, umožňujícím nepřerušit produkci i po výměně katody.

Dělení motivu expozice je nutné pro souvislé plochy difraktující světlo pod jedním úhlem. Návrhář může využít dělení na expoziční pole obecného tvaru pro podporu motivu obrazu, návrh masky pro dělení by však byl nutný návrhářem motivu expozice. Postup návrhu masky je dostupný v literatuře **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..**

7 ZÁVĚR

Realizace reliéfních difraktivních struktur pro optické elementy pomocí elektronové litografie dosáhla stanovených cílů ve všech ohledech.

Difrakční účinnost difrakčních mřížek se zvýšila především díky možnosti přizpůsobení dat expozice aktuálnímu stavu litografu. Přesnost generovaných difrakčních mřížek se zvýšila jak pro techniku Multimatrix[®], tak i pro techniku e-Direct[™].

V oblasti Fourierovských difraktivních struktur bylo dosaženo oproti původním výsledkům výrazných zlepšení v oblastech difrakční účinnosti a ostrosti realizací iterativní Fourierovy transformace, přesnosti, návrhem a realizací algoritmů pro převod popisu difraktivních struktur zadaných ve formátu obrázků na technologicky optimalizovaná expoziční data pro elektronový litograf, který také umožnil zvýšení rozlišení generovaných difraktivních struktur, které dále zvyšuje kvalitu dosažených výsledků. Algoritmus při všech popsanych zlepšeních přináší snížení počtu elementárních expozic.

Myšlenka algoritmu navrženého pro Fourierovské difraktivní struktury byla znovu využita i pro převod zadání nedifraktivních struktur na expoziční data. Algoritmus umožnil zadávání vstupů v rozlišení litografu a přináší snížený počet elementárních expozic na svém výstupu.

Algoritmus navržený a realizovaný pro Fresnelovské difraktivní struktury umožňuje především vyšší rozmanitost volby zadání a zcela zbavuje omezení velikosti požadovaného výstupu.

Algoritmus pro dělení plochy hologramu do expozičních oken byl navržen, realizován a použit pro snížení rušivého dojmu.

Pro umístování většího počtu pohledů do jednoho místa plochy byl navržen a realizován algoritmus provádějící kontrolu vzájemné vzdálenosti bodů kontrolovaného motivu umístěných náhodným generátorem a v případě potřeby provádí jejich úpravu.

Algoritmus pro kalibraci elektronového litografu BS600 před expozicí umožněnou instalací snímače elektronů a použití elektronového litografu v režimu rastrovacího elektronového mikroskopu přinesl snížení časové náročnosti kalibrace z hodin na desítky minut, což výrazně přispělo i ke zvýšení její přesnosti.

Další rozvoj elektronového litografu BS600 se zaměřil směrem popsáním ve **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..** Hardwarové změny otevírají nové možnosti pro výzkum a vývoj v oblasti elektronové litografie a jejím využití pro realizaci optických difraktivních struktur.

8 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] van Renesse, R. L., "Optical Document Security", Artech House, London, third edition, 366 pages, 2005. (ISBN 1-58053-258-6)
- [2] Ryzi, Z., et al., "Optical Device and Method of Manufacture", Optaglio Ltd., patent WO 03 009225, filed July 16, 2002, published January 30, 2003.

- [3] Lee, R. A., "The Pixelgram – an Application of Electron Beam Lithography for the Security Printing Industry", SPIE Vol. 1509 Holographic Optical Security Systems, The Hague, Netherlands, March 14-15, 1991, pp. 48-54.
- [4] Kotačka, L., et al., "Synthetic Holography at 500000 dpi: from Renaissance of Portraits to Holographic Dust", The 2008 Conference on Optical Security and Counterfeit Deterrence, 23–25 January 2008, San Francisco, California, paper 26, 13 pages, 2008.
- [5] Schilling, A., Tompkin, W. R., "Diffractive OVDs for Window Features in Banknotes", idem, paper 22, 14 pages, 2008.
- [6] Despland, C. A., et al., "Creation of Novel Security Features Using Optically Variable Magnetic Inks", idem, paper 20, 10 pages, 2008.
- [7] Raksha, V., et al., "Printable Appearance-Changing Graphical Security Devices", idem, paper 14, 15 pages, 2008.
- [8] Braginet, E. et al., "Complex Computer-Synthesised Holograms Forming Uncaused Fields", idem, paper 23, 8 pages, 2008.
- [9] Ohala, J., "Visual Effect Created by an Array of Reflective Facets with Controlled Slopes", patent WO 90 08338, filed December 26, 1989, published July 26, 1990.
- [10] Ryzí, Z., "Způsob vytvoření trojrozměrného obrazu, difraktivní prvek a způsob jeho vytvoření", Optaglio s.r.o., vynález CZ-2004-869, přihlášeno 6.8.2004, zveřejněno 15.3.2006.
- [11] Ryzí, Z., et al., "A Method of Creating Three-Dimensional Image, a Diffractive Element and a Method of Creating the Same", Optaglio s.r.o., patent WO 06 013215, filed August 8, 2005, published February 9, 2006.
- [12] Tompkin, W. R., Schilling, A., "Layer Arrangement Provided with a Structure Producing a Diffractive Optical Effect and a Lens-Type Effect", OVD Kinegram AG, patent WO 04 049250, filed November 7, 2003, published June 8, 2004.
- [13] Gajda, R., Stepień, P., "Optically Variable Device (OVD) and a Method of Recording OVD and an OVD Recorder", WO 97 16772, filed October 29, 1996, published May 9, 1997.
- [14] Haliček, M., "Vyhodnocení difrakční účinnosti optických mřížek", FEI VUT Brno, 2000. [Diplomová práce]
- [15] Gavenda, R., "Program pro přípravu dat rozměrných struktur". [Bakalářská práce]
- [16] Kolektiv autorů, "Elektronový litograf BS 600 a jeho technologické aplikace", Ústav přístrojové techniky ČSAV, SÚZ, 1989.
- [17] Vašina, J.: "Popis příkazů programu EXPO V1.6", Eltek spol.s r.o., Manuál programu Expo, 2004.
- [18] Vašina, J.: "Popis struktury binárních dat", Manuál programu Expo.NET, 2006.
- [19] Kolařík, V., "Datové toky okolo litografu BS 600", VUT v Brně, Brno 2002 [Habilitační práce]
- [20] Škereň, M., Richter, I., and Fiala, P., "Iterative Fourier transform algorithm: comparison of various approaches", J. Mod. Opt. 49 (11), 1851–1870 (2002).
- [21] Škereň, M., Richter, I., and Fiala, P., "Design of binary phase-only diffractive optical elements for laser beam shaping", pp. 154-164. Laser beam shaping, Proc. SPIE Vol. 4095 (2000).

- [22] Škereň, M., Richter, I., and Fiala, P., "Laser beam shaping by binary and multi-level phase-only diffractive optical elements", Laser beam shaping II, Proc. SPIE Vol. 4443, 2001. (0277-786X ISSN)
- [23] Fedor, A., "Binary Optic Diffuser Design", Proc. SPIE Vol. 4557, pp. 378-385, Micromachining and Micro fabrication Process Technology VII ,2001
- [24] Escher, M. C., "Vision of Symmetry", China, ISBN 0-500-51169-1
- [25] "Zařízení pro zhotovení opticky variabilních difraktivních struktur", ČVUT FJFI a Lightgate a.s., patent CZ 2001-12094, přihlášeno 15.6.2001, zveřejněno 12.9.2001.
- [26] Laakkonen, P. et al., "Electron-Beam-Fabricated Asymmetric Transmission Gratings for Microspectroscopy", Applied Optics, Vol. 39, No. 19, 1 July 2000, pp. 3187-3191.
- [27] Steenblik, R.A., and Hurt, M.J., "Apparatus for Providing Autostereoscopic and Dynamic Images and Method of Manufacturing Same", Applied Physics Research, L.P., U.S. patent 5,568,313, filed March 2, 1994, published October 22, 1996.
- [28] Tompkin, W.R., and Staub, R., "Machine-Verifiable Diffractive Features for Document Security", in Proc. of SPIE Conference on Optical Security and Counterfeit Deterrence Techniques II, Vol. 3314, San Jose, CA, January 28-30, 1998, pp. 203-213.
- [29] Souparis, H., and Daniel, F., "Method for the Production of an Optically Variable Image", Hologram Industries, patent WO 95 23986, filed March 3, published September 8, 1995.
- [30] Staub, R., et al., "Combination Gratings", Proc. of the SPIE Conference on Diffractive and Holographic Optics Technology III, Vol. 2689, San Jose, CA, 1996, pp. 292-299.
- [31] van Renesse, R.L., "Security Aspects of Commercially Available Dot Matrix and Image Matrix Origination Systems", Proc. International SPIE Conference on Optical Holography and Its Application, Kiev, Ukraine, May 24-26, 2004.
- [32] Kyser, D.F., and Viswanathan, N.S., "Monte Carlo Simulation of Spatially Distributed Beams in Electron-Beam Lithography", Journa Vac. Sci Technol., Vol. 12, No 6, Nov./Dec. 1975, pp. 1305-1308.
- [33] Kyser, D.F., and Pyle, R., "Computer Simulation of Electron-Beam Resist Profile", IBM J. Res Develop., Vol. 24, No. 4, July 1980, pp. 426-437.
- [34] Owen, G., "Methods for Proximity Effect Correction in Electron Lithography", J. Vac. Sci. Technol. B 8 (6), Nov/Dec 1990, pp. 1889-1892.
- [35] Seo, E., et al., "Determination of Proximity Effect Parameters and The Shape Bias Parameter in Electron Beam Lithography", Elsevier Science B.V., Microelectronic Engineering 53 (2000), pp. 305-308.
- [36] van Renesse, R.L., "Ordering The Order - A Survey of Optical Document Security Features", SPIE Vol. 2406, 1995, pp. 268-275. (ISBN 0-8194-1753-X)
- [37] Babin, S. et al., "Comprehensive Simulation of Electron-Beam Lithography Process Using PROLITH/3D and TEMPTATION Software Tools", Elsevier Science B.V., Microelectronic Engineering, 57-58 (2001), pp. 343-348. (ISSN 0167-9317)
- [38] Matějka, F., et al., "Reducing the Size of a Rectangular-Shaped Electron Beam in E-Beam Writing System", Proc. of the 8th Multinational Congress on Microscopy. Prague : Czechoslovak Microscopy Society, 2007, s. 87-88. (ISBN 978-80-239-9397-4)

- [39] Matějka, F., "Fabrication of Multilevel Diffractive Optical Elements using Electron Beam Lithography", Proc. of the 9th International Workshop on Applied Physics of Condensed Matter. Ľilina: FEE University of Ľilina, 2003, s. 241 - 244. (ISBN 80-8070-088-5)
- [40] Matějka, F., a Ryzí, Z, "Electron Beam Lithography - a Tool for Nanotechnologies?", Proc. of Nano '02 - national conference. Praha: Czech Society for New Materials, 2002, s. 28. (ISBN 80-7204-258-0)
- [41] Matějka, F., and Matějková, J., "Optimisation of Reliefs of Thin Polymer Films of Resist for Phase Diffractive Optical Elements", Proc. of Electronic Devices and Systems Y2K - Intensive Training Programme in Electronic System Design - Workshop. Brno: Technical University Brno, 2000 - (Musil, V.) s. 199-201. (ISBN 80-214-1780-3)
- [42] Kolařík, V., et al., "Towards the sub-100nm E-Beam Writing System", NANO '05. Abstract booklet. Brno: Vysoké učení technické, 2005, s. 116. (ISBN 80-214-3044-3)
- [43] Kolařík, V. et al., "Temperature Monitoring of the EBL Facility" Electronic devices and systems 02 - proceedings. Experimental methods in acoustic and electromagnetic emission. Brno: VUT, 2002 - (Musil, V.), s. 207 - 210. (ISBN 80-214-2180-0)

9 VLASTNÍ PRÁCE AUTORA

- [44] Daněk, L., "Methods Used to Determine Exposition Curve for Diffractive Relief", Brno, 2003, 80-214-2379-X
- [45] Daněk, L., "Lukáš Daněk: Calibration of the Deflection Field of the Lithograph Using SEM Mode", Brno, 2004, 80-239-2268-8
- [46] Daněk, L., "Non-diffractive submicron structures forming on electron beam lithograph BS601", Portorož, Slovenia, 2005, ISBN 961-6303-69-4
- [47] Daněk, L., "A tool for division of exposition to sections of non-rectangular shape", Brno, 2005, 80-214-2888-0
- [48] Daněk, L., "Algorithms for conversion of diffractive structures into exposition data", Brno, 2005, 80-214-2888-0
- [49] Kolařík, V., a kol., "Zápis tvarovaným elektronovým svazkem", Jemná mechanika a optika, ročník 53, č. 1 (2008), s. 11-16. (ISSN 0447-6441)
- [50] Kotačka, L., et al., "Optical Security Device Offering 2D images", Optaglio s.r.o., patent WO 07 063137, filed December 1, 2006, published June 7, 2007. van RENESSE, Rudolf L. Optical Document Security. London: Artech House, 2005. 364 pages. ISBN 1-58053-258-6.